

**VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky**

**Využití optovláknových DTS systémů pro monitoring vývoje
trhlin mostních konstrukcí**

**Using of Fiber-Optic DTS Systems for Development
Monitoring of Crack Bridges**

Zadání bakalářské práce

Student: **Michal Miček**

Studijní program: B2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor: 2601R013 Telekomunikační technika

Téma: **Využití optovláknových DTS systémů pro monitoring vývoje trhlin mostních konstrukcí**
Using of Fiber-Optic DTS Systems for Development Monitoring of Crack Bridges

Zásady pro vypracování:

Optovláknové DTS (*Distribution Temperature Systems*) a DSTS (*Distribution Strain and Temperature Systems*) jsou unikátní systémy, které využívají nelineárních jevů (Raman, Brillouin) v optickém vlákne pro snímání teploty (mechanického napětí). Úkolem absolventské práce je navrhnout využití těchto systémů při monitoringu vývoje trhlin mostních konstrukcí a návrhy experimentálně ověřit v Laboratoři stavebních materiálů Fakulty stavební (FAST).

1. Popište princip činnosti optovláknových DTS systémů.
2. Navrhněte využití optovláknových DTS systémů pro monitoring vývoje trhlin mostních konstrukcí.
3. Návrhy experimentálně ověřte na zkušebním lisu EU 40.

Seznam doporučené odborné literatury:

LONG, Derek A. *The Raman Effect: A Unified Treatment of the Theory of Raman Scattering by Molecules*. 1. Edition. England: John Wiley & Sons, April 2002. 598 p. ISBN 978-0-471-49028-9.


DADO, Milan, et al. *Kapitoly z optiky: pro technikov*. Žilina: Žilinská univerzita v Žilině, 1998. 348 p. ISBN 80-7100-390-5.

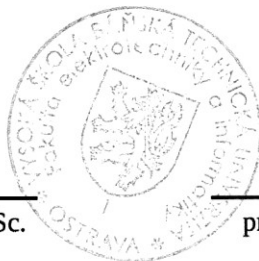
Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

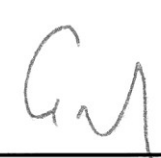
Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Petr Koudelka**

Datum zadání: 16.11.2012

Datum odevzdání: 07.05.2013


prof. RNDr. Vladimír Vašínek, CSc.
vedoucí katedry




prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prehlásenie študenta

Prehlasujem, že som túto bakalársku prácu vypracoval samostatne. Uviedol som všetky literárne pramene a publikácie, z ktorých som čerpal.

Dňa: 6.5.2013



.....
podpis študenta

Pod'akovanie

Rád by som poďakoval Ing. Petrovi Koudelkovi za odbornú pomoc a konzultáciu pri vytváraní tejto bakalárskej práce. Rovnako aj Ing. Janovi Hurtovi, za odbornú pomoc pri realizovaní praktickej časti práce v laboratórií stavebných hmôt na Stavebnej fakulte.

Abstrakt

Bakalárska práca sa zaoberá využitím optovláknových distribuovaných systémov na monitorovanie prasklín v mostových konštrukciách. Ako senzor bol použitý DTS systém využívajúci stimulovaný Ramanov rozptyl, ktorý dokáže snímať iba teplotu pozdĺž optického vlákna. Preto je hlavná časť bakalárskej práce zameraná na zistenie vplyvu mechanického napätia na teplotu v optickom vlákne. Tento vplyv bol experimentálne testovaný na trhacom stroji FP 10/1 a neskôr na skúšobnom lise EU 40 v laboratóriu stavebných hmôt na Stavebnej fakulte. Všetky namerané hodnoty a ich grafické spracovanie sú súčasťou prílohy tejto bakalárskej práce.

Kľúčové slova

optovláknové distribuované systémy, DTS, DSTS, stimulovaný Brillouinov rozptyl, stimulovaný Ramanov rozptyl, vplyv mechanického napätia na teplotu

Abstract

This bachelor thesis is focused on usage of optical-fibered distributed systems for monitoring cracks on bridge constructions. DTS system using simulated Raman scattering, which can read just temperature along optical fiber was used as temperature sensor. It's the reason why the main part of thesis is focused on finding out impact of strain on temperature in optical fiber. This impact was experimentally tested on the ripper FP 10/1 and then on the probationary pressing machine EU 40 at the construction materials lab of Faculty of Civil Engineering. All measured values and their graphical representation is part of this bachelor thesis.

Key words

distributed fiber optic systems, DTS, DSTS, stimulated Brillouin scattering, stimulated Raman scattering, impact of strain on temperature

Zoznam použitých skratiek

Skratka	Anglický význam	Slovenský význam
DTS	Distributed Temperature System	Distribučný teplotný systém
DSTS	Distributed Strain and Temperature System	Distribučný napäťový a teplotný systém
SBS	Stimulated Brillouin Scattering	Stimulovaný Brillouinov rozptyl
SRS	Stimulated Raman Scattering	Stimulovaný Ramanov rozptyl
LPR	Landau-Placzek Ratio	Landau Placzek pomer

Obsah

1	Úvod	1
2	Nelineárne optické javy	2
2.1	Brillouinov rozptyl	2
2.2	Ramanov rozptyl	3
3	Stimulované rozptyly	5
3.1	Stimulovaný Brillouinov rozptyl	5
3.2	Stimulovaný Ramanov rozptyl	6
4	Konštrukcia optických senzorov	8
4.1	Distribované optovláknové senzory	8
4.1.1	DSTS systém využívajúci Brillouinov rozptyl	8
4.1.2	DTS systém využívajúci Ramanov rozptyl	9
4.2	Optické vlákna s Braggovskou mriežkou	10
5	Kalibrácia vlákna	12
5.1	Načítanie konfiguračného súboru	12
5.2	Vloženie informácií o kalibrácií	12
5.3	Akvizičný čas	12
5.4	Korekcia dĺžky	13
5.5	Nastavenie rozsahu merania	13
5.6	Korekcia teplotnej strmosti	13
5.7	Teplotný posun	14
5.8	Prevod dynamických hodnôt	15
5.9	Nastavenie meraných úsekov	15
5.10	Priemerovanie trasy	15
5.11	Nastavenie opakovacieho času	15
5.12	Dokončenie konfigurácie	16
6	Meranie	17
6.1	Meranie na trhacom stroji FP 10/1	17
6.1.1	Uchytenie pomocou lepidla	18
6.1.2	Uchytenie pomocou prípravku	18
6.2	Meranie optického vlákna so sekundárnou ochranou	19
6.3	Meranie optického vlákna s primárnou ochranou	20

6.4	Zhodnotenie merania na trhacom stroji FP 10/1	22
6.5	Meranie na skúšobnom lise EU 40.....	22
6.6	Zhodnotenie merania na skúšobnom lise EU 40	24
7	Záver.....	25
	Použitá literatúra	XXVI
	Zoznam príloh	XXVIII

1 Úvod

Témou tejto bakalárskej práce bolo navrhnúť využitie optovláknových DTS systémov pre monitoring vývoja trhlín v mostových konštrukciách. Pretože DTS systémy využívajúce Ramanov rozptyl dokážu merať iba teplotu pozdĺž optického vlákna, zisťoval som vplyv mechanického napätia na teplotu.

Práca je rozdelená celkom do šiestich nasledujúcich kapitol. V prvej sa venujem popisu nelineárnych javov vznikajúcich v optickom vlákne. Je v nej popísaný Brillouinov a Ramanov rozptyl. V druhej kapitole je uvedený stimulovaný Brillouinov a stimulovaný Ramanov rozptyl a ich prahové výkony pri ktorých vznikajú. V tretej kapitole je popísaná konštrukcia dvoch typov optických senzorov. V prvej časti kapitoly popisujem princíp činnosti DSTS systémov využívajúcich stimulovaný Brillouinov rozptyl a DTS systémov využívajúcich stimulovaný Ramanov rozptyl. V ďalšej časti popisujem princíp činnosti senzorov využívajúcich vlákna s Braggovskou mriežkou. Vo štvrtej kapitole sa podrobne venujem kalibrácii optického vlákna na DTS systéme, ktorá je veľmi dôležitá pre správne fungovanie senzora. Nasledujúca piata kapitola je venovaná samotnému meraniu. Venujem sa v nej zisťovaniu vplyvu mechanického napätia na teplotu v optickom vlákne. V kapitole je popísané experimentálne meranie na trhacom stroji FP 10/1 a skúšobnom lise EU 40. Šiesta kapitola je záverečná a je v nej uvedené celkové zhrnutie výsledkov mojej práce.

2 Nelineárne optické javy

V tejto kapitole je popísaný Brillouinov a Ramanov rozptyl. Sú to nelineárne javy vznikajúce v optickom vlákne.

2.1 Brillouinov rozptyl

Je javom v nelineárnom optickom prostredí tretieho rádu a súvisí so šírením akustickej vlny v optickom vlákne. Spojenie optických polí a akustických vln dochádza prostredníctvom elektrostriekcie. Akustická vlna o nadkritickom výkone spôsobí lokálnu zmenu indexu lomu a v tomto mieste dôjde k oddeleniu fotónu od šíriaceho sa signálu a tento fotón sa potom šíri v opačnom smere oproti tejto vlne. Takto rozptýlená vlna je frekvenčne posunutá nižšie oproti postupnej vlne. Vytvorená spätná vlna má vplyv na stabilitu a pomer šumu zdroja vysielania.

Pozrime sa na rozptyl ako na kvantovo-mechanickú interakciu akustickej a optickej vlny. Šíriace svetlo si predstavujeme ako súbor fotónov – častíc s energiou jedného fotónu:

$$E_F = \hbar \cdot \omega_F, \quad (2.1)$$

a impulzom

$$\mathbf{p}_F = \hbar \cdot \mathbf{k}_F, \quad (2.2)$$

kde ω_F je kruhová frekvencia svetelnej vlny, \mathbf{k}_F je jej vlnový vektor, $\hbar = h/2\pi$ je redukovaná Planckova konštanta. Na akustickú vlnu nazeráme ako na súbor fonónov – častíc s energiou

$$E_A = \hbar \cdot \omega_A, \quad (2.3)$$

a impulzom

$$\mathbf{p}_A = \hbar \cdot \mathbf{k}_A, \quad (2.4)$$

kde ω_A je kruhová frekvencia akustickej vlny, \mathbf{k}_A je jej vlnový vektor. Z pohľadu kvantovej mechaniky na interakciu svetelnej vlny s látkou potom nazeráme ako na proces, keď fotón dáva vznik novému fotónu a jednému fonónu, alebo naopak, fotón a fonón dávajú vzniknúť novému fotónu. V týchto procesoch musí byť splnený zákon zachovania energie a zachovania impulzu. To znamená, že súčet energie fotónu a energie fonónu pred „zrážkou“ sa rovná energii vzniknutej častice (rozptýleného fotónu) po zrážke. Podobne to platí pre impulz. Matematicky to vyjadríme:

$$\hbar \cdot \omega_F \pm \hbar \cdot \omega_A = \hbar \cdot \omega'_F, \quad (2.5)$$

$$\hbar \cdot \mathbf{k}_F \pm \hbar \cdot \mathbf{k}_A = \hbar \cdot \mathbf{k}'_F, \quad (2.6)$$

kde znamienko (+) vo vzťahoch (2.5) a (2.6) znamená vznik fonónu, znamienko (-) zánik fonónu, ω_F je kruhová frekvencia rozptýlenej svetelnej vlny a \mathbf{k}_F je jej vlnový vektor. Keď ďalej uvažíme, že $\omega_F = c \cdot \mathbf{k}_F$, $\omega'_F = c \cdot \mathbf{k}'_F$, $\omega_A = v_A \cdot \mathbf{k}_A$. Vidíme, že pri rozptyle svetla na akustickej vlne platia vzťahy:

$$\mathbf{k}'_F = \mathbf{k}_F \pm \mathbf{k}_A, \quad (2.7)$$

$$\frac{c \cdot \mathbf{k}'_F}{n} = \frac{c \cdot \mathbf{k}_F}{n} \pm v_A \cdot \mathbf{k}_A, \quad (2.8)$$

kde $n(\omega'_F)$ a $n(\omega_F)$ sú absolútne indexy lomu prostredia pre rozptýlenú a primárnu svetelnú vlnu. Pretože $v_A \ll c$ vzhľadom na vzťah (2.8) je $\mathbf{k}'_F \approx \mathbf{k}_F$ (porovnateľné). Preto vlnový vektor \mathbf{k} , resp. vlnové číslo akustickej vlny je s uhlom rozptylu zviazaný vzťahom:

$$\mathbf{k}_A = 2 \cdot \mathbf{k}_F \cdot \sin\left(\frac{\Theta}{2}\right), \quad (2.9)$$

a frekvencia akustickej vlny bude daná:

$$\omega_A = 2 \cdot \omega_F \cdot n(\omega_F) \cdot \frac{v_F}{c} \sin\left(\frac{\Theta}{2}\right). \quad (2.10)$$

K najväčšej zmene frekvencie dôjde vtedy, keď sa rozptýlená vlna šíri späť, t.j. keď $\Theta = \pi$. Vtedy bude frekvencia akustickej vlny ω_A maximálna (cca 10^{10} s^{-1}).

Zo vzťahu (2.6) môžeme určiť frekvenciu rozptýlenej vlny, keď dosadíme za vlnové vektory pomer príslušnej kruhovej frekvencie a rýchlosti šírenia. Potom frekvencia rozptýlenej vlny bude:

$$\omega'_F = \omega_F \pm \omega_A, \quad (2.11)$$

Zo vzťahu (2.11) vidíme, že v rozptýlenom svetle sa môžu objaviť satelitné čiary s frekvenciami $(\omega_F + \omega_A)$, ktorým hovoríme antistokesove a $(\omega_F - \omega_A)$ stokesove (zložky) čiary. [1]

2.2 Ramanov rozptyl

Pri prechode žiarenia skúmanou látkou dôjde nielen k absorpcii (prípade k fluorescencii), ale aj k rozptylu žiarenia. K rozptylu žiarenia na molekulách dochádza v okamihu, keď sa fotón vstupujúceho žiarenia zrazí s molekulou skúmanej látky. Časť budiaceho žiarenia (cca 10^{-8}) sa zúčastní nepružných zrážok fotónu s molekulou. Vtedy dopadajúci fotón predá časť svojej energie molekule, alebo od nej určité kvantum energie príjme. Takto vzniknuté rozptýlené žiarenie bude mať rozdielnú frekvenciu od budiaceho žiarenia. Tento jav sa nazýva Ramanov rozptyl.

Kľúčovou vlastnosťou molekúl pre vznik rozptýleného svetla je ich polarizabilita. Polarizabilita α , predstavuje schopnosť pôsobiaceho elektrického poľa \mathbf{E} spôsobiť dipólový moment \mathbf{p} .

$$\mathbf{p} = \alpha \cdot \mathbf{E}. \quad (2.12)$$

V molekule s rovnovážnou geometriou, označujeme polarizabilitu ako α_0 . Vo vzdialenosti Δr , od rovnovážnej geometrie molekuly, je okamžitá polarizácia daná tvarom:

$$\alpha = \alpha_0 + \left(\frac{\partial \alpha}{\partial r} \right) \Delta r, \quad (2.13)$$

kde derivát $(\partial \alpha / \partial r)$ predstavuje zmenu polarizability so zmenou pozície. Samozrejme, ak je molekula vo vibračnom alebo rotačnom sínusoidnom móde, Δr môže byť zapísaná, ako nejaká sínusoidná funkcia vzhľadom k frekvencii vibrácií ν a času t :

$$\Delta r = r_{\max} \cos(2\pi \nu t), \quad (2.14)$$

R

kde r_{\max} je maximálny vibračný rozkmit. Svetelné žiarenie, ktoré má konkrétnu frekvenciu ν_0 je indukované elektrickým poľom \mathbf{E} , ktoré má taktiež sínusoidný priebeh:

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_{\max} \cos(2\pi \nu_0 t), \quad (2.15)$$

k

kde \mathbf{E}_{\max} je maximálna hodnota indukovaného elektrického poľa. Ak vzťahy (2.13), (2.14) a (2.15) preniesieme do rovnice (2.12), dostaneme výslednú rovnicu:

$$\mathbf{p} = \alpha_0 \mathbf{E}_{\max} \cos(2\pi \nu_0 t) + \mathbf{E}_{\max} r_{\max} \left(\frac{\partial \alpha}{\partial r} \right) \cos(2\pi \nu t) \cos(2\pi \nu_0 t), \quad (2.16)$$

túto rovnicu môžeme upraviť podľa obecného vzťahu:

$$\cos a \cdot \cos b = \frac{1}{2} (\cos(a+b) + \cos(a-b)), \quad (2.17)$$

Po nahradení a za $(2\pi \nu t)$ a b za $(2\pi \nu_0 t)$ v rovnici (2.17), dostaneme konečný stav rovnice pre vyjadrenie veľkosti dipólového momentu \mathbf{p} :

$$\mathbf{p} = \alpha \mathbf{E}_{\max} \cos(2\pi \nu_0 t) + \frac{\mathbf{E}_{\max} r_{\max}}{2} \left(\frac{\partial \alpha}{\partial r} \right) \cos(2\pi(\nu_0 + \nu)) + \cos(2\pi(\nu_0 - \nu)). \quad (2.18)$$

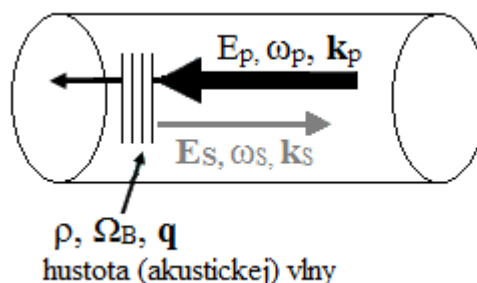
Vo výslednej rovnici (2.18) sa nachádzajú tri členy s rozdielnou hodnotou frekvencie rozptýleného žiarenia. Prvý člen rovnice predstavuje Rayleighovo rozptýlenie, v ktorej sa zúčastňuje iba frekvencia budiaceho žiarenia ν_0 . Druhý a tretí člen rovnice odpovedajú anti-Stokesovej resp. Stokesovej časti Ramanovho rozptylu. Anti-Stokesovú časť Ramanovho rozptylu charakterizujú vyššie frekvencie $(\nu_0 + \nu)$, ako frekvencie budiaceho žiarenia. Oproti tomu je Stokesova časť charakterizovaná frekvenciami nižšími $(\nu_0 - \nu)$, (obr. 2.1). Z rovnice (2.18) je tiež zrejmé, že pre vznik Ramanovho rozptylu je nutné, aby pri danom vibračnom pohybe dochádzalo ku zmene polarizovateľnosti, teda aby:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial r} \neq 0. \quad (2.19)$$

3 Stimulované rozptyly

3.1 Stimulovaný Brillouinov rozptyl

Stimulovaný Brillouinov rozptyl (SBS) je dominantný nelineárny jav v optickom vlákne. Tento jav nastane pri dopadajúcom optickom poli o dostatočnej intenzite[3]. Dopadajúce optické pole dostatočnej intenzity sa zrazí s rozptýleným optickým poľom, čo vedie k zmenám hustoty a tlaku prostredníctvom elektrostriekcie. Rozptýlené svetlo so Stokesovou frekvenciou sa pridá k Stokesovmu žiareniu, ktoré produkuje akustické rušenie. Týmto spôsobom akustické a Stokesove vlny vzájomne posilňujú svoj rast, a každá z nich môže vyrásť k veľkej amplitúde. Táto skutočnosť je znázornená na obrázku č. 3.1. Dopadajúca vlna o amplitúde E_p , frekvencii ω_p a vlnovom vektore \mathbf{k}_p sa rozptýli o ustupujúcu zvukovú vlnu o amplitúde ρ , frekvencii Ω_B a vlnovom vektore \mathbf{q} a vytvorí rozptýlenú vlnu o amplitúde E_s , frekvencii ω_s a vlnovom vektore \mathbf{k}_s . [4]



Obrázok 3.1: Stimulovaný Brillouinov rozptyl v optickom vlákne

Pretože zákon zachovania energie a hybnosti musia byť zachované, frekvencie a vlnové vektory čerpajúcich, rozptýlených a akustických polí sú dané vzťahmi:

$$\Omega_B = \omega_p - \omega_s, \quad (3.1)$$

$$\mathbf{q} = \mathbf{k}_p - \mathbf{k}_s, \quad (3.2)$$

kde ω_p je frekvencia čerpajúceho poľa, ω_s je frekvencia Stokesoveho poľa, \mathbf{k}_p je vlnový vektor čerpajúceho poľa a \mathbf{k}_s je vlnový vektor Stokesoveho poľa. Brillouinova frekvencia Ω_B a vlnový vektor akustického poľa \mathbf{q} sú zviazané vzťahom:

$$\Omega_B = |\mathbf{q}|v_A \approx 2v_A |\mathbf{k}_p| \sin\left(\frac{\theta}{2}\right), \quad (3.3)$$

kde v_A je rýchlosť zvuku v médiu a θ je uhol zvierajúci čerpajúce a Stokesove pole. Avšak v jednovidovom optickom vlákne uhol θ má hodnoty 0 a π a preto Brillouinov frekvenčný posun je daný vzťahom:

$$v_B = \frac{2nv_A}{\lambda_p}, \quad (3.4)$$

kde n je index lomu jadra vlákna a λ_p je vlnová dĺžka čerpajúceho svetla.

Hodnotu prahového výkonu naviazaného do optického vlákna, pri ktorom vznikne Brillouinov rozptyl, vyjadrime pomocou rovnice[3]:

$$P_{th}^{SBS} \approx \frac{21bA_{eff}}{g_B L_{eff}}, \quad (3.5)$$

kde b je polarizačný faktor, A_{eff} je efektívny prierez jadra vlákna, g_B je koeficient Brillouinovho zisku a L_{eff} je efektívna dĺžka vlákna. Hodnota polarizačného faktoru b sa pohybuje medzi 1 a 2 v závislosti na polarizácii čerpajúcej a Stokesovej vlny. Pre $A_{eff} \approx 50 \mu m^2$, $L_{eff} \approx 20$ km a $g_B = 4 \cdot 10^{-11}$ m/W, $b=1$ a pre vlnovú dĺžku 1550 nm je prahový výkon $P_{th} \approx 1,3$ mW. [3]

3.2 Stimulovaný Ramanov rozptyl

Stimulovaný Ramanov rozptyl je prahový jav, ktorý vzniká ak intenzita čerpajúcej svetelnej vlny s frekvenciou ω_p dopadá na látkové prostredie a prevyšuje prahovú hodnotu $I_p \geq I_{thr}$. Pri splnení tejto podmienky sa Stokesova vlna s frekvenciou $\omega_s = \omega - \omega_M$ exponenciálne zosilňuje pri šírení prostredím. Na nájdenie Ramanovho prahu, by sme mali uvažovať o nelineárnej interakcii medzi čerpajúcou a Stokesovou vlnou. Túto interakciu môžeme popísať sústavou dvoch viazaných rovníc: [5]

$$\frac{\partial I_S}{\partial z} = g_R I_P I_S - \alpha_S I_S, \quad (3.6)$$

$$\frac{\partial I_P}{\partial z} = -\frac{\omega_P}{\omega_S} g_R I_P I_S - \alpha_P I_P, \quad (3.6)$$

kde I_P je intenzita čerpajúcej vlny, I_S je intenzita stokesovej vlny, g_R je účinnosť ramanovho zisku, α_S predstavuje straty vo vlákne na Stokesovej frekvencii a α_P predstavuje straty vo vlákne na čerpajúcej frekvencii. Môžeme ľahko overiť, že v prípade absencie strát,

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{I_S}{\omega_S} + \frac{I_P}{\omega_P} \right) = 0. \quad (3.6)$$

Táto rovnica uvádza, že celkový počet fotónov v čerpajúcom a Stokesovom lúči zostáva počas SRS konštantný. Prah intenzity čerpajúceho žiarenia závisí na zisku v Ramanovom médiu a na dĺžke oblasti čerpania. Bolo preukázané, že SRS sa vytvorí zo spontánneho Ramanovho rozptylu na celej dĺžke vlákna. Efektívna dĺžka vlákna je daná vzťahom [6]

$$L_e(z) = \frac{1 - e^{-\alpha z}}{\alpha} \approx \frac{1}{\alpha}, \quad (3.6)$$

kde α sú straty v optickom vlákne a z je vzdialenosť. Zatiaľ čo intenzita spontánneho Ramanovho rozptylu je o niekoľko rádov nižšia ako intenzita budiaceho žiarenia, intenzita stimulovaného Stokesovo Ramanovho žiarenia je približne rovnaká ako intenzita budiaceho žiarenia.

Stokesov výkon je definovaný s exponenciálnym zosilnením g ako [6]:

$$P_s(L) = P_s(0) e^{(g_R \cdot P(0) L_e / A_e)}, \quad (3.6)$$

kde g_R je účinnosť Ramanovho zisku, $P(0)$ výkon čerpacej vlny, L_e efektívna dĺžka vlákna, $P_s(0)$ je výkon signálu a A_e je efektívny prierez jadra vlákna. Ramanov prah môžeme predpovedať celkom presne. Pre dlhé vlákne, $a \ll 1$, $L_e \approx 1/a$, na vlnovej dĺžke $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$, blízko ktorej je útlm vlákna minimálny okolo $0,02 \text{ dB.km}^{-1}$, $L_e \approx 20 \text{ km}$ a typickej hodnote $A_e = 50 \mu\text{m}^2$, predpokladaný Ramanov prah je $P(0) \approx 600 \text{ mW}$. [5]

4 Konštrukcia optických senzorov

Táto kapitola popisuje princíp dvoch typov optických senzorov. V prvej časti je popis distribuovaných optovláknových senzorov využívajúcich Ramanov a Brillouinov rozptyl. V časti druhej je popísané optické vlákno s Braggovskou mriežkou, ktoré má využitie aj ako senzor teploty a mechanického napätia.

4.1 Distribuované optovláknové senzory

Distribuované optovláknové systémy, sú systémy, ktoré dokážu merať teplotu alebo mechanické napätie v optickom vlákne. Hodnoty teploty alebo mechanického napätia sú snímané pozdĺž optického vlákna a tak môžeme získať teplotný alebo mechanicko-napäťový profil pozdĺž celého vlákna. Technologicky sú optovláknové distribuované systémy založené na princípe optického reflektometra, tzn., že do vlákna je vyslaný svetelný impulz o definovanej vlnovej dĺžke, veľkosti a dobe trvania. Určitá časť impulzu sa vplyvom nelineárneho rozptylu v optickom vlákne vráti späť na detektor. Podľa typu nelineárneho rozptylu konštrukčne rozdeľujeme tieto systémy na DSTS systémy detekujúce stimulovaný Brillouinov rozptyl a DTS systémy detekujúce stimulovaný Ramanov rozptyl.



Obrázok 4.1: Optovláknový distribuovaný systém

4.1.1 DSTS systém využívajúci Brillouinov rozptyl

Tieto systémy sú schopné merať teplotný profil pozdĺž optického vlákna ako aj profil mechanického napätia. Tieto systémy využívajú ako senzor jednovidové optické vlákno do maximálnej vzdialenosti až do 30 km. Priestorová rozlíšiteľnosť Brillouin DSTS systémov je štandardne 1m s teplotnou rozlíšiteľnosťou 0,01 °C. [7]

Informáciu o teplote pozdĺž optického vlákna môžeme určiť pomerom intenzity elastického Rayleigha rozptylu a neelastického Brillouinovho rozptylu známeho ako Landau Placzek pomer, [8]:

$$LPR = \frac{T_f}{T} (\beta_T \rho_0 v_a^2 - 1) \quad (4.1)$$

kde T_f je fiktívna teplota, β_T je izotermická stlačiteľnosť, ρ je hustota materiálu a v_a je akustická rýchlosť. Profil mechanického napätia pozdĺž optického vlákna môžeme získať použitím napäťovo-mechanických odoziev v známej teplote definovaných ako:

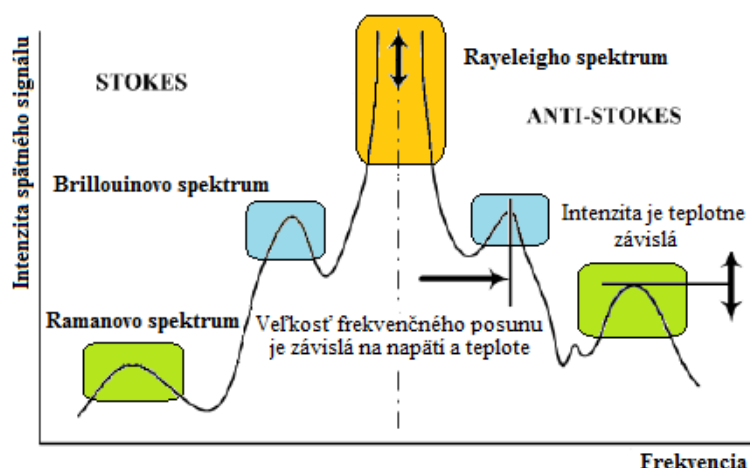
$$R(\varepsilon)_{T_D} = \frac{\zeta(\varepsilon)_{T_D}}{1 - \zeta(\varepsilon)_{T_D}} \quad (4.2)$$

kde $\zeta(\varepsilon)_{T_D}$ je Brillouinov prenos pre danú teplotu T_D kolísajúcu iba s mechanickým napätím ε na optickom vlákne.

Intenzita Brillouinovho rozptylu je daná vzťahom:

$$I_{BS} \propto \frac{T}{\omega^2} \left| \int \vec{q}_1 e^{i(\vec{k}_p - \vec{q}_1) \cdot \vec{r}} + \vec{q}_2 e^{i(\vec{k}_p - \vec{q}_2) \cdot \vec{r}} d\vec{r} \right|^2 \quad (4.2)$$

kde T je teplota, ω je akustická uhlová rýchlosť, \vec{k}_p je vlnový vektor rozptýleného svetla, γ je relatívna fáza pre zmenu smeru módu pola. Brillouinov rozptyl rozdeľujeme v oblasti optického spektra na časti anti-Stokes a Stokes, ktoré sú zobrazené na obrázku č. 4.2. Teplotne (napätovo-mechanicky) je závislá iba časť anti-Stokes.



Obrázok 4.2: Spektrum rozptýleného žiarenia

4.1.2 DTS systém využívajúci Ramanov rozptyl

Tieto systémy sú schopné merať iba teplotný profil pozdĺž optického vlákna. DTS systémy využívajúce Ramanov rozptyl využívajú ako senzor mnohovidové optické vlákno s veľkou hodnotou numerickej apertúry pre maximalizovanie vedenej intenzity spätne odrazeného svetla, pretože veľkosť spätne odrazeného Ramanovho rozptylu je pomerne malá. Dosah týchto systémov je približne 8 – 10 km. Priestorová rozlíšiteľnosť je 1m s teplotnou rozlíšiteľnosťou 0,01 °C. [7]

V prípade, že chceme merať teplotu v určitej časti optického vlákna z (vzdialenosť od čela optického vlákna), je nevyhnutné aby sme sa zamerali na spektrum Ramanovho rozptylu. I_S predstavuje intenzitu Stokesovej časti Ramanovho rozptylu, I_{AS} predstavuje intenzitu anti-Stokesovej

časti Ramanovho rozptylu. Lasery používané v DTS systémoch na základe Ramanovho rozptylu majú zvyčajne vlnovú dĺžku 1064 nm. [9]

Konečný matematický vzťah popisujúci princíp činnosti DTS systému na základe Ramanovho stimulovaného rozptylu je popísaný v rovnici č.4.3. Výsledný vzťah je lineárnou kombináciou teplotného offsetu (prvá časť rovnice), diferencie útlmu v optickom vlákne (druhá časť rovnice) a meranej teploty na základe pomeru anti-Stokesovej a Stokesovej časti Ramanovho spektra (tretia časť rovnice). [9]

$$T(z) \cong T_{REF} \left(1 + \frac{\Delta\alpha z}{\ln\left(\frac{C_S}{C_{AS}}\right)} + \frac{\ln\left(\frac{I_S(z)}{I_{AS}(z)}\right)}{\ln\left(\frac{C_S}{C_{AS}}\right)} \right) \quad (4.3)$$

kde C_S a C_{AS} sú konštanty, $\Delta\alpha = \alpha_S - \alpha_{AS}$ a je väčší ako nula a $T(z)$ je veľkosť teploty v mieste z od čela optického vlákna.

Vzťah teplotného offsetu T_{REF} je:

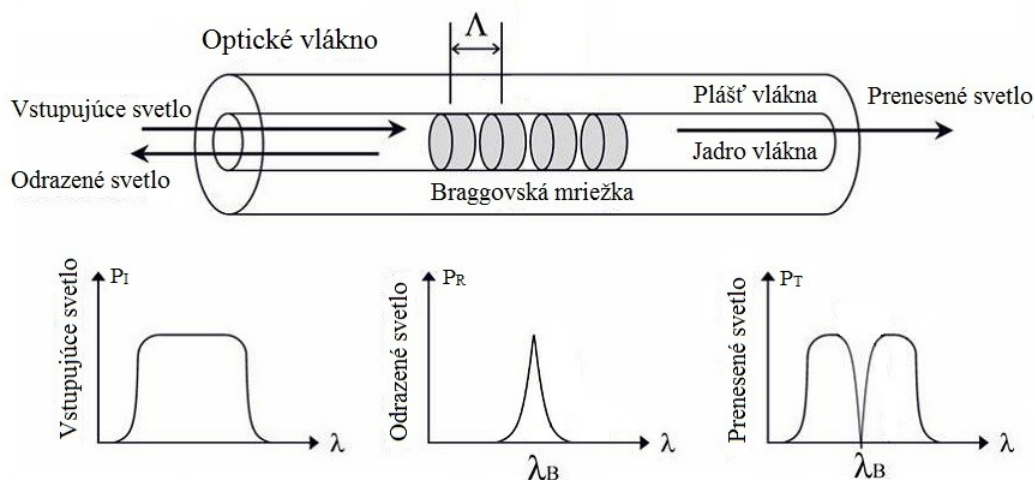
$$T_{REF} = \frac{h\Omega}{k \ln\left(\frac{C_S}{C_{AS}}\right)} \quad (4.3)$$

kde k je Boltzmanova konštanta, $2\pi\Omega$ je červený a modrý frekvenčný posun a h je Planckova konštanta.

4.2 Optické vlákna s Braggovskou mriežkou

Optické vlákna s Braggovskou mriežkou sú špeciálne vlákna, ktoré majú v jadre vytvorenú mriežku s periodickými zmenami indexu lomu. Zmeny indexu lomu v štruktúre jadra vlákna sú vytvorené pomocou fotosenzitivity. Vďaka tomuto javu môžeme v určitých miestach vhodne dotovaného skla zvýšiť index lomu úmerne dodanej dávke UV žiarenia. Jednotlivé mriežky sú do aktívneho jadra vlákna zapisované použitím UV žiarenia. V dnešnej dobe sa používa niekoľko techník zapisovania mriežky do vlákna.

Princíp funkcie Braggovskej mriežky je znázornený na obrázku č. 5.1. V sklenenom jadre vlákna je vytvorená mriežka, ktorá predstavuje striedajúcu sa oblasť s vyšším indexom lomu a periódou Δ , ktorá je nasledovaná oblasťami s nižším indexom lomu. Ak do štruktúry jadra vlákna naviažeme optický signál P_I ako vedený mód, na každom rozhraní mriežky je určitá časť dopadajúceho svetla rozptýlená, kôli zmene indexu lomu. Rozptýlené svetlo sa potom fázovo sčíta, ale iba v smeroch, v ktorých je splnená fázová podmienka. Inak povedané, ak sú vo vlákne splnené podmienky jednomódovej činnosti, potom na každej ploche mriežky je určitá časť fotónov módu slabodrazená vo fáze s odrazmi s predchádzajúcich plochách mriežky, čím je vygenerovaný spätný vedený mód o Braggovskej vlnovej dĺžke λ_B . Energia ktorú nesie spätný mód P_R sa určí integráciou rozptýleného žiarenia. Optická energia ktorá sa nerozptýli, označovaná na obrázku ako P_T je prenesená ako dopredne šíriaci sa mód.



Obrázok 5.1: Princíp funkcie Braggovskej mriežky

Optické vlákna s Braggovskými mriežkami sa využívajú okrem iného aj ako senzory na snímanie mechanického napätia alebo teploty. Základný princíp používaný v týchto senzoroch je v sledovanie posunu vlnovej dĺžky rozptýleného Braggovského signálu so zmenami v meranej veličine (mechanické napätie, teplota). Braggovská vlnová dĺžka je daná vzťahom [10]:

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \quad (5.1)$$

kde n_{eff} je efektívny index lomu jadra vlákna a Λ je perióda zmien indexu lomu.

Zmena mechanického napätia vzniká v dôsledku fyzického natiahnutia senzora (zodpovedajúca zmena periódy indexu lomu) a lokálnej zmeny indexu lomu vlákna v dôsledku fotoelastického efektu. Tepelná odozva vzniká v dôsledku prirodzenej tepelnej rozťažnosti materiálu vlákna a tepelnej závislosti indexu lomu. Posun Braggovskej vlnovej dĺžky s mechanickým napätím a teplotou môže byť vyjadrený vzťahom [11]:

$$\Delta\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \left\{ \left[1 - \left(\frac{n_{eff}^2}{2} \right) [P_{12} - \nu(P_{11} + P_{12})] \right] \varepsilon + \left[\alpha + \frac{\left(\frac{dn}{dT} \right)}{n_{eff}} \right] \Delta T \right\} \quad (5.1)$$

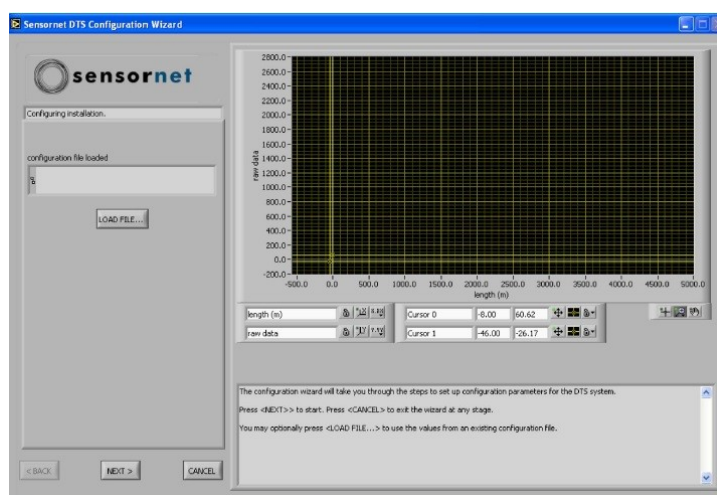
Kde ε sa vzťahuje k mechanickému napätiu, P_{ij} sú Pockelove koeficienty optického tenzoru mechanického napätia, ν je Poissonova konštanta, α je koeficient tepelnej rozťažnosti materiálu vlákna a ΔT je zmena teploty.

5 Kalibrácia vlákna

Pred každým meraním na DTS systéme musíme najskôr uskutočniť kalibráciu vlákna. Ku kalibrácii je okrem DTS systému potrebné predradné vlákno a presný teplomer na určenie správnej teploty. Kalibráciu spustíme v hlavnom menu programu Sensornet DTS, kde vyberieme možnosť „Edit Configuration“ a v nasledujúcej ponuke „Run configuration wizard“. Sprievodca konfiguráciou obsahuje 12 kľúčových bodov, ktoré musia byť splnené pre presnú kalibráciu systému Sentinel DTS.[12]

5.1 Načítanie konfiguračného súboru

Prvý krok konfigurácie je nepovinný a umožňuje užívateľovi načítať existujúci konfiguračný súbor pre prípadné úpravy. Túto voľbu uskutočníme stlačením tlačidla „Load File...“ a je obzvlášť užitočná pri použití DTS systému na meraní, ktorého vlastnosti a optické vlákna sú podobné predchádzajúcemu meraniu. Ak nechceme použiť existujúci súbor a potrebujeme vytvoriť vlastnú konfiguráciu stlačíme rovno tlačidlo „Next“. Ako vyzerá prvý krok konfigurácie, môžeme vidieť na obrázku č. 5.1.



Obrázok 5.1: Prvý krok konfigurácie, [12]

5.2 Vloženie informácií o kalibrácii

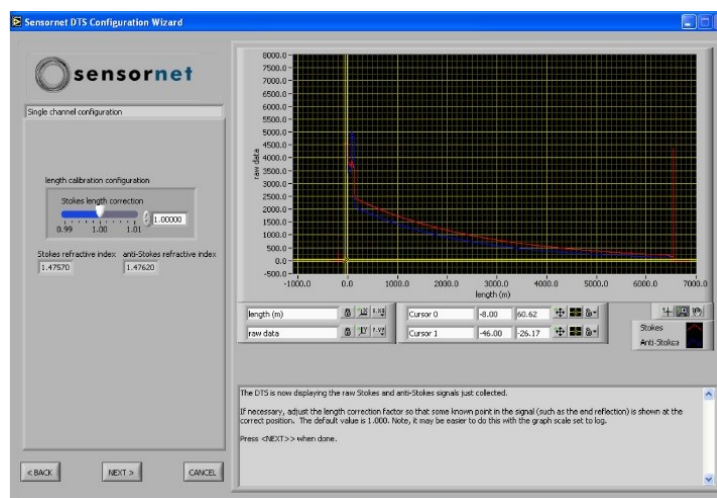
V druhom kroku nastavujeme názov kalibrácie a prípadné informácie k nej, ako napríklad typ vlákna a podobne. Tlačidlo „Save data“ nám umožňuje zapnúť alebo vypnúť ukladanie konfiguračných dát na pevný disk systému DTS. K ďalšiemu kroku sa prepneme tlačidlom „Next“.

5.3 Akvizičný čas

V tomto kroku zadávame akvizičný čas, po ktorom bude snímaná teplota spriemerovaná. Priemerovanie nasnímaných hodnôt systémov DTS je potrebné pri meraní s vysokým rozlíšením. Akvizičný čas môžeme vybrať z rozsahu od 15 až do 3600 sekúnd, predvolený čas je 30 sekúnd. Dlhší čas je spravidla nutný pri snímaní veľmi dlhého optického vlákna. Hodnotu akvizičného času nastavíme do kolónky „data acquisition time“, potom stlačíme tlačidlo „Collect data“ a následne tlačidlo „Next“.

5.4 Korekcia dĺžky

Vo štvrtom kroku konfigurácie nastavujeme korekciu dĺžky alebo disperzie. Tento proces zaisťuje, že DTS systém meria vzdialenosť pozdĺž optického vlákna s optimálnym rozlíšením. Ako môžeme vidieť na obrázku č. 5.2. v grafe sú zobrazené dve zložky signálu. Stokesova (červená) a anti-Stokesova (modrá) zložka sa šíria v optickom vlákne rôznymi rýchlosťami. Pre správnu funkciu DTS systému sa musia tieto dve zložky zladit' do jedného referenčného bodu pozdĺž optického vlákna. Najbežnejší spôsob kontroly je na konci trasy, kde teplota klesá zvislo dolu voči ose x. Obe zložky musia preťať osu x v bode nula v rovnakej vzdialenosti. Samotné nastavenie korekcie uskutočníme posuvným tlačidlom kde pohybom doľava alebo doprava obe zložky signálu zrovnáme.



Obrázok 5.2: Štvrtý krok konfigurácie – korekcia dĺžky, [12]

5.5 Nastavenie rozsahu merania

V tomto kroku nastavujeme rozsah merania. To nám umožňuje obmedziť množstvo zbytočných dát, ktoré sú snímané mimo rozsah. Obmedzenie množstva zbytočných dát nám pomáha k zníženiu veľkosti dátových súborov a výrazne zlepšuje viditeľnosť stopy zobrazenej na displeji. Snímaný rozsah nastavíme posuvným tlačidlom, alebo vpísaním príslušnej hodnoty do bieloho okienka.

5.6 Korekcia teplotnej strmosti

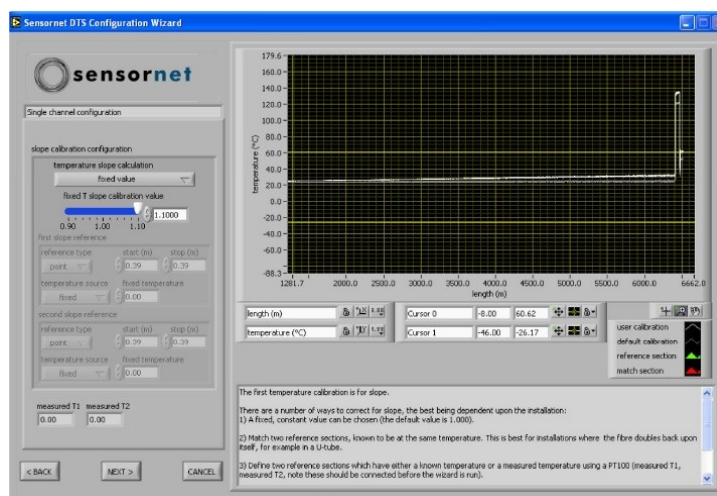
V šiestom kroku konfigurácie upravujeme teplotnú strmosť. Tým zaistíme, že nasnímané teplotné údaje sú správne po celej dĺžke optického vlákna. Tento krok je veľmi dôležitý a pomerne zdĺhavý. Pri nastavovaní korigujeme útlm vlákna, ktorý spôsobuje že s rastúcou vzdialenosťou stúpa teplota snímaná DTS systémom. Nastaviť korekciu môžeme tromi spôsobmi:

Metódou pevnej hodnoty nastavíme hodnotu teplotnej strmosti vpísaním do okienka alebo pomocou posuvného tlačidla. Hodnotu meníme tak, aby graf bol vo vodorovnom smere úplne vyrovnaný. Pôvodný graf je stále zobrazený šedou farbou a graf s nami nastavenou hodnotou korekcie je zobrazený bielou farbou. Pri nastavovaní teplotnej strmosti touto metódou je dôležité, aby sa celá dĺžka vlákna nachádzala v známej konštantnej teplote. Korekcia nastavená touto metódou je zobrazená na obrázku č. 5.3.

Pri metóde Odpovedajúceho úseku nastavujeme korekciu zadáním umiestnenia dvoch tzv. odpovedajúcich úsekov. Tieto úseky sú na opačnom konci vlákna, ale musia sa nachádzať v prostredí s rovnakou teplotou. Systém tieto dva body zrovná do roviny a tým vyrovná celý graf. Začiatok a koniec úseku zadávame do bielych okienok.

Pri metóde Referenčného úseku zadávame do systému umiestnenie dvoch známych úsekov, ktoré sa na rozdiel od predchádzajúcej metódy nemusia nachádzať v prostredí rovnakou teplotou. Vzďialenosti zapisujeme do bielych okienok doplnené o informáciu o teplote, v ktorom sa úsek nachádza. Systém tieto dva úseky nastaví do odpovedajúcich teplôt a tým zrovná celý graf. U tejto metódy nemusíme zadávať celý úsek ale iba bod.

My sme pri kalibrácii používali metódu Pevného bodu.



Obrázok 5.3: Nastavenie teplotnej strmosti metódou Fixnej hodnoty, [12]

5.7 Teplotný posun

V siedmom kroku konfigurácie nastavujeme teplotný posun. Ten kalibruje absolútnu hodnotu teploty snímanú DTS systémom. Tento krok má rovnakú metodiku ako krok č.6, kde sú hodnoty teplôt snímané DTS systémom porovnávané s hodnotami na referenčnej sonde. Nastavenie toho kroku môžeme pomocou dvoch metód:

Metóda pevnej hodnoty umožňuje užívateľovi zadať vopred stanovenú hodnotu kompenzácie. Pokiaľ chceme používať túto metódu, v ponuke „temperature offset calculation“ vyberieme možnosť „fixed value“. Pomocou posuvného tlačidla alebo vpísaním hodnoty do okienka posúvame graf vo zvislom smere. Tým docielime aby systém ukazoval teplotu, ktorá je v okolí vlákna, a ktorá sa má správne snímať. Pri nastavovaní touto metódou je dôležité, aby sa vlákno nachádzalo v známej konštantnej teplote. K zisteniu teploty nám slúži presný teplomer.

Pri Metóde referenčného úseku zadávame začiatok a koniec časti vlákna, ktorého teplotu poznáme. Systém posunie celý graf tak, aby nám zobrazoval správnu teplotu. Teplotu určíme presným teplomerom, alebo teplotnými sondami systému DTS. Namiesto metódy referenčného úseku, môžeme použiť referenčný bod.

5.8 Prevod dynamických hodnôt

V tomto kroku konfigurácie nastavujeme prevod dynamických kalibračných hodnôt na pevné kalibračné hodnoty. Túto možnosť máme pri predchádzajúcich dvoch bodoch konfigurácie kde dynamické hodnoty môžeme previesť na statické, následne ich uložiť a používať pri nasledujúcich nastaveniach. Ak chceme previesť dynamickú kalibračnú hodnotu na pevnú kalibračnú hodnotu klikneme na tlačidlo „Fix“ vedľa zodpovedajúcej hodnoty. Pre ďalší krok konfigurácie stlačíme tlačidlo „Next“.

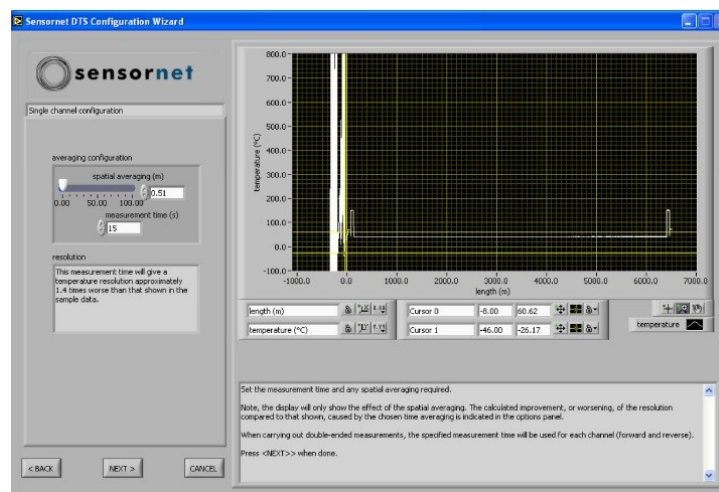
5.9 Nastavenie meraných úsekov

V deviatom kroku konfigurácie máme možnosť nastaviť merané úseky, ktoré sú pre nás zaujímavé. Po stlačení tlačidla „Add zones...“ sa nám zobrazí nové okno, do ktorého zadáme názov, začiatok a koniec požadovaného úseku. Pri zadaní viacerých úsekov sa nám zoradia od najbližšieho po najvzdialenejší.

5.10 Priemerovanie trasy

V desiatom kroku konfigurácie nastavujeme priemerovanie trasy. To nám umožňuje určiť dobu merania a rozsah priestorového rozlíšenia. Priestorové rozlíšenie definuje rozsah, ktorý bude obsahovať údaje o teplote v jednom mieste. Minimálnu hodnotu, ktorú sme v našom prípade mohli nastaviť je 1,02 m a zadávame ju do prvého bieleho okienka. Príliš veľká hodnota priestorového rozlíšenia môže zapríčiniť stratu dôležitých teplotných informácií. Hodnotu doby merania zapisujeme do druhého bieleho okienka, a platí že čím je doba merania väčšia, tým je lepšie rozlíšenie trasy a zobrazovaná krivka je hladšia. Desiaty konfiguračný krok je zobrazený na obrázku č. 5.10.

V našom prípade sme zvolili priestorové rozlíšenie 1,02 m a dobu merania 10 s.



Obrázok 5.4: Desiaty krok konfigurácie – priemerovanie trasy, [12]

5.11 Nastavenie opakovacieho času

V jedenástom kroku nastavujeme opakovací čas snímania. Opakovací čas určuje dobu, po ktorú bude trvať jedna iterácia daného merania. Čas zapisujeme do prvého bieleho okienka, a jeho minimálna hodnota nesmie byť menšia ako hodnota času z predchádzajúceho kroku. V tomto kroku

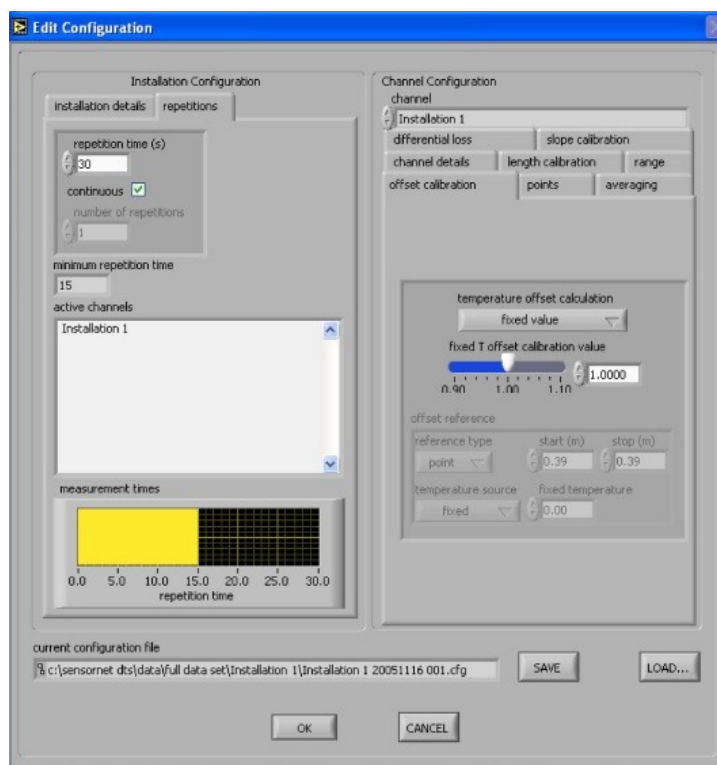
konfigurácie máme možnosť nastaviť, či bude naše meranie kontinuálne, to znamená že DTS systém bude snímať dovtedy, dokým meranie neukončíme, alebo nastavíme vopred určenú dobu snímania. Pre kontinuálne meranie musíme mať zaškrtnuté políčko „continuous“. Pokiaľ chceme merať vopred stanovený čas, necháme políčko nezaškrtnuté a do druhého okienka zadáme počet iterácií.

Pre naše meranie sme zvolili čas jednej iterácie 10 s. V predchádzajúcom kroku sme nastavili takisto 10 s, to znamená, že počas celej iterácie prebiehalo meranie. Nastavili sme aj možnosť „continuous“, pretože sme potrebovali meranie sami prerušiť.

5.12 Dokončenie konfigurácie

Dvanásty a zároveň posledný krok konfigurácie nám umožňuje uložiť konfiguráciu a ukončiť sprievodcu. Názov konfiguračného súboru vkladáme do šedého políčka naľavo v dialógovom okne. Uloženie dokončíme stlačením tlačidla „Next“ a následne „File Saved“. Ďalším stlačením tlačidla „Next“ úspešne ukončíme konfiguráciu.

Po dokončení konfigurácie sa nám ešte zobrazí okno „Edit Configuration“. V tomto okne si môžeme zobraziť všetky nastavené hodnoty a popri prípade niektorú z nich zmeniť. Ako vyzerá okno konfigurácie môžeme vidieť na obrázku č. 5.4.



Obrázok 5.5: Okno konfigurácie, [12]

6 Meranie

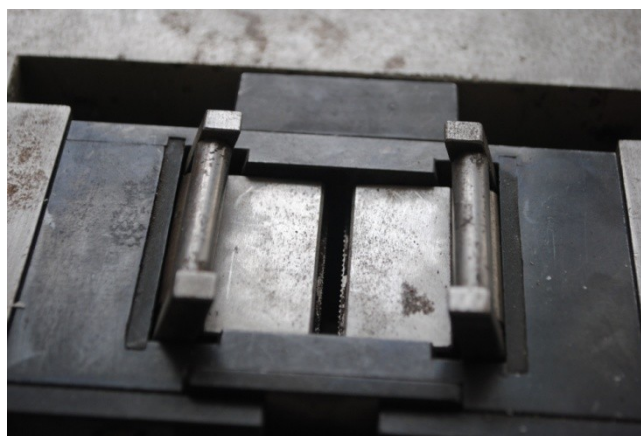
Zmyslom merania bolo zistiť vplyv mechanického napätia v optickom vlákne na teplotu. Mechanické napätie vyvíjané na vlákno som simuloval na trhacom stroji FP 10/1 a skúšobnom lise EU 40. Všetky merania boli uskutočnené v laboratórií stavebných hmôt na Stavebnej Fakulte.

6.1 Meranie na trhacom stroji FP 10/1

Na trhacom stroji FP 10/1, ktorý je zobrazený na obrázku č. 6.1 sme testovali dva typy optického vlákna. Multimódové optické vlákno (50/125 μm) so sekundárnou ochranou a multimódové optické vlákno (50/125 μm) s primárnou ochranou. Veľký problém pri meraní bol z uchytením optického vlákna do klieštín. Na obr. č. 6.2 môžeme vidieť, že priame uchytenie optického vlákna do klieštín nieje možné, pretože by došlo k jeho poškodeniu. Preto sme museli nájsť vhodnú metódu pre uchytenie.



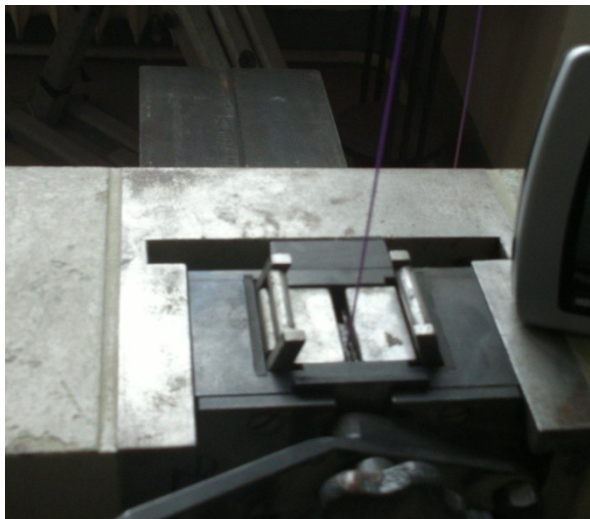
Obrázok 6.1: Trhací stroj FP 10/1



Obrázok 6.2: Jedna z klieštín trhacieho stroja FP 10/1

6.1.1 Uchytenie pomocou lepidla

Ako prvú sme zvolili metódu uchytenia pomocou špeciálneho lepidla Sikadur -31 CF Rapid, naneseného v tých miestach optického vlákna, ktoré boli uchytené v klieštínach. Lepidlo bolo nanesené deň vopred aby dôkladne vytvrdlo. Uchytenie optického vlákna s nanesením lepidlom v miestach úchytu môžeme vidieť na obrázku č. 6.3. Po odskúšaní táto metóda nebola vhodná, pretože sekundárna a primárna ochrana sa vplyvom tlaku natiahla a vlákno v zlepenom mieste prekĺzlo. Preto sme museli zvoliť inú metódu uchytenia.



Obrázok 6.3: Uchytenie optického vlákna s naneseným lepidlom v mieste uchytenia

6.1.2 Uchytenie pomocou prípravku

Druhá metóda uchytenia optického vlákna je pomocou prípravku, ktorý sme upevnili do klieštín trhacieho stroja. Samotný prípravok je rúrka s priemerom 5 cm. Pri tejto metóde sme optické vlákno niekoľkokrát obtočili okolo prvého prípravku a následne tým istým spôsobom aj na druhej strane klieštín, kde bol umiestnený rovnaký prípravok. Na závitky bolo nanesené pre istotu ešte špeciálne rýchlo schnúce lepidlo, aby sa vlákno vplyvom mechanického napätia neposunulo. Spôsob uchytenia na jedenej z klieštín je zobrazený na obrázku č. 6.4.



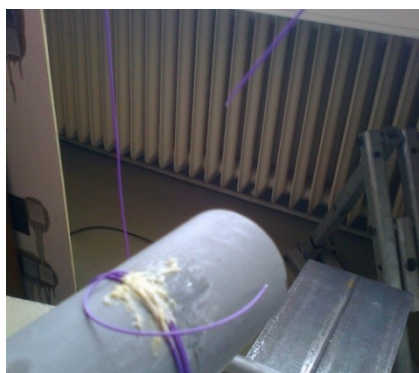
Obrázok 6.4: Uchytenie optického vlákna do klieštín pomocou prípravku

Tento spôsob uchytenia sa prejavil ako vhodný, tak sme mohli prejsť k samotnému meraniu.

6.2 Meranie optického vlákna so sekundárnou ochranou

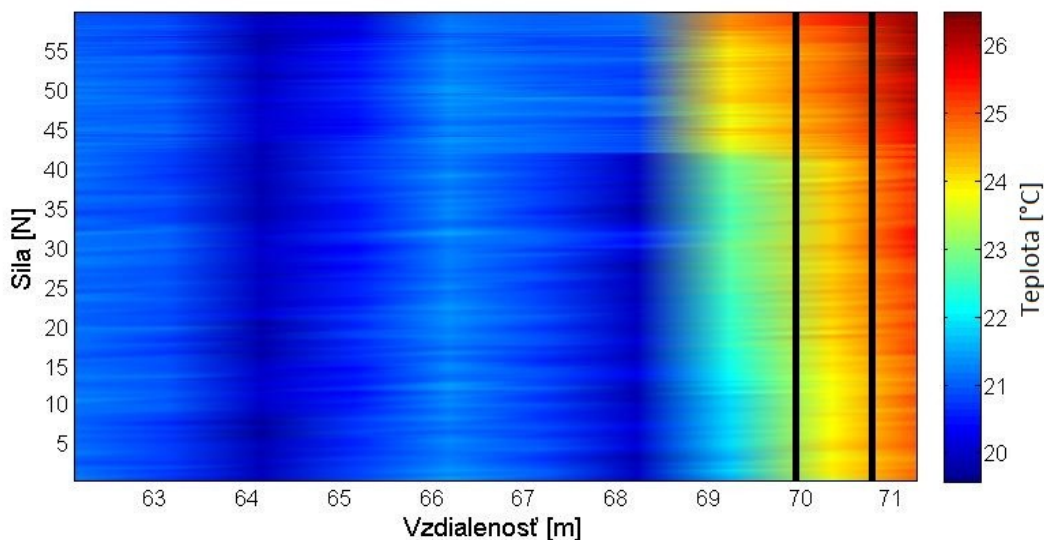
Ako prvé sme uskutočnili meranie optického vlákna so sekundárnou ochranou. Optické vlákno sme pripojili k DTS systému cez predradné vlákno s dĺžkou 50 m. Po kalibrácii sme vlákno omotaním okolo prípravku umiestnili do klieštín, spôsobom popísaným v kapitole č. 6.1.2. Na trhacom stroji sme nastavili rýchlosť posunu 2 mm/min a mohli sme začať merať. Naše meranie teda spočívalo v ťažení vlákna až kým nedošlo k jeho pretrhnutiu. Pri meraní bola v miestnosti stála teplota 21 °C, ktorú sme odčítali z presného teplomera.

Po pretrhnutí optického vlákna sa trhací stroj automaticky vypol, DTS systém sme museli vypnúť manuálne. Na to aby sa vlákno so sekundárnou ochranou roztrhlo bolo potrebné vyvinúť silu 57,73 N. Pretrhnuté optické vlákno môžeme vidieť na obrázku č. 6.5. Po skončení merania sme dáta z DTS systému a z trhacieho stroja uložili a výsledky spracovali pomocou programu Matlab.



Obrázok 6.5: Pretrhnutie vlákna

Výsledky z merania sú zobrazené v nasledujúcich grafoch. Na obrázku č. 6.6 je graf zobrazujúci teplotný profil pozdĺž optického vlákna ako aj umiestnenie optického vlákna na klieštínach trhacieho stroja. Klieštiny sú v grafe zobrazené zvislými čiernymi čiarami.

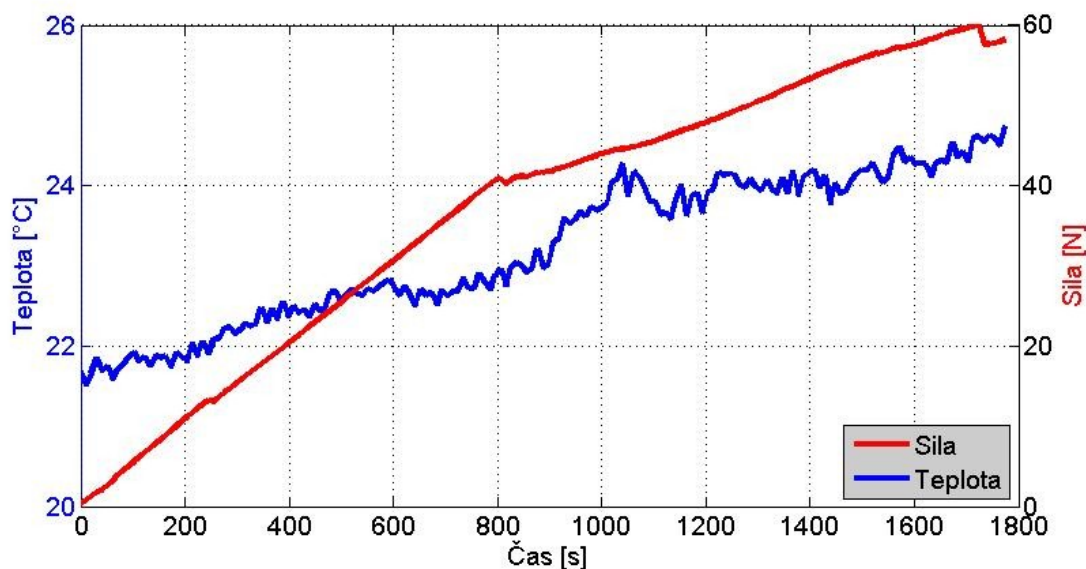


Obrázok 6.6: Graf zobrazujúci teplotný profil pozdĺž optického vlákna so sekundárnou ochranou

Z grafu môžeme vidieť, že zo vzrastajúcou silou spôsobujúcou mechanické napätie mierne stúpla teplota v miestach, kde je vlákno uchytené v klieštínach. Teplota vo vlákne v mieste kde dochádzalo

počas merania k mechanickému napätiu stúpala o 3 °C. Teplota sa nepatrne menila po celú dobu ťahania.

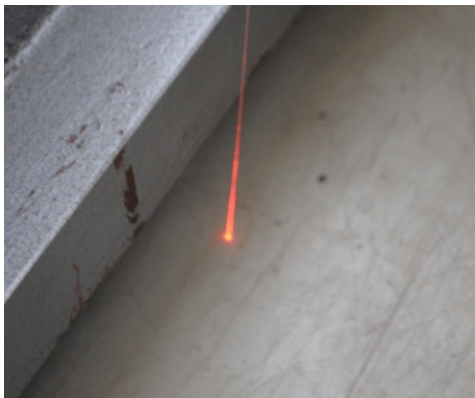
Na obrázku č. 6.7 je graf, zobrazujúci závislosť teploty a sily v čase, vo vzdialenosti 69,223m. V tomto mieste je optické vlákno uchytené v klieštinách ťhacieho stroja. Z grafu je zrejmé, že ako sa klieštiny ťhacieho stroja od seba vzdďaľovali, stúpala sila pôsobiaca na optické vlákno ako aj teplota. Tabuľka z nameraných hodnôt je súčasťou prílohy.



Obrázok 6.7: Graf zobrazujúci závislosť teploty a sily v čase, vo vzdialenosti 70,238 m.

6.3 Meranie optického vlákna s primárnou ochranou

V ďalšom meraní sme testovali vlákno s primárnou ochranou. Postupovali sme rovnako ako pri meraní na optickom vlákne so sekundárnou ochranou. Merané vlákno sme pripojili k DTS systému cez predradné vlákno, ktoré sme potom skalibrovali (kapitola č. 5). Pri umiestňovaní tohto typu optického vlákna na prípravok sme museli postupovať veľmi opatrne, pretože primárna ochrana je slabá a mohlo by dôjsť k poškodeniu vlákna. Po umiestnení optického vlákna na obidva prípravky v klieštinách ťhacieho stroja sme vlákno preto skontrolovali s prístrojom na vyhľadávanie porúch.



Obrázok 6.8: Kontrola poškodenia optického vlákna

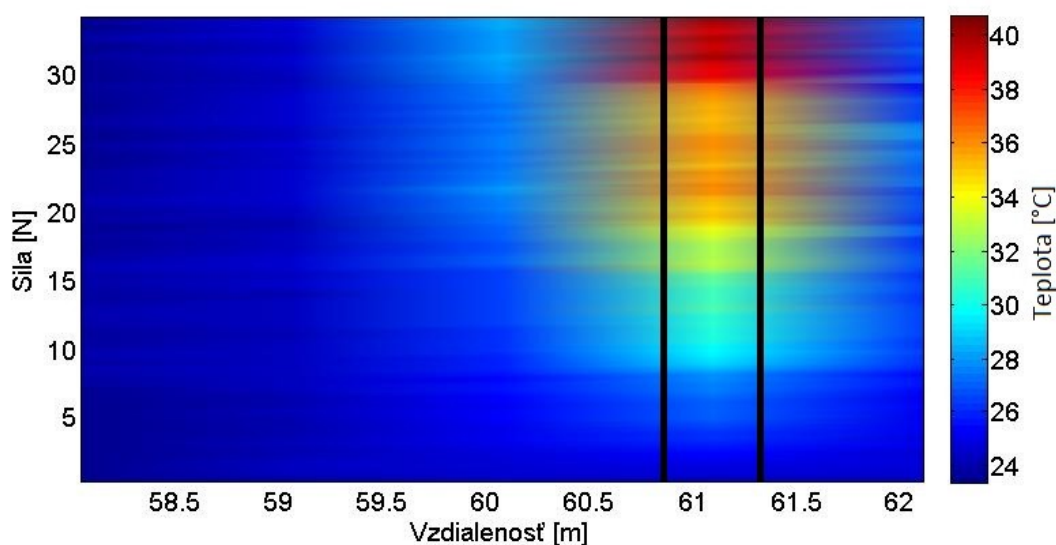


Obrázok 6.9: Vlákno s primárnou ochranou umiestnené na prípravku

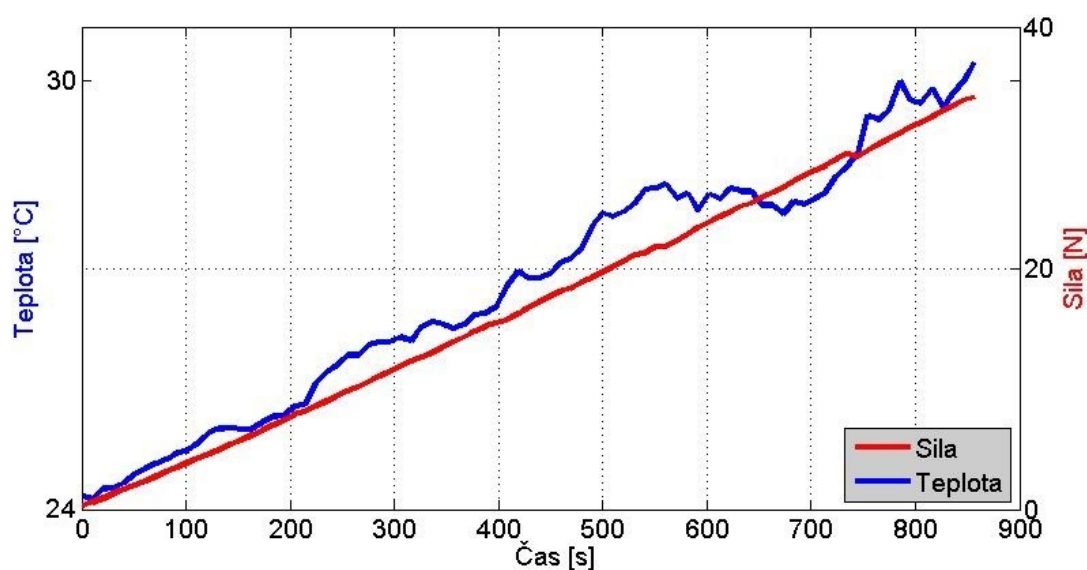
Tento prístroj vyžaruje jasne červený laserový lúč, takže svetlo unikajúce z poškodeného vlákna môžeme ľahko spozorovať. Kontrola je zobrazená na obrázku č. 6.8, svetlo sa vyviazalo na konci vlákna, takže dopadla dobre. Samotné umiestenie vlákna na prípravku je zobrazené na obrázku č.6.9.

Po úspešnom umiestení optického vlákna na trhací stroj, sme mohli prejsť k meraniu. Princíp merania bol rovnaký ako pri meraní vlákna so sekundárnou ochranou. Pri tomto meraní bola v laboratóriu teplota 24 °C. Tento krát na pretrhnutie optického vlákna s primárnou ochranou bolo potrebné vyvinúť silu 34,16 N. Po pretrhnutí vlákna sme ukončili meranie a uložili dáta. Dáta z DTS systému a trhacieho stroja sú spracované v nasledujúcich grafoch.

Rovnako ako v predchádzajúcom meraní graf na obrázku č. 6.10 zobrazuje teplotný profil pozdĺž optického vlákna a s umiestením klieštín (čierne zvislé čiary).



Obrázok 6.10: Graf zobrazujúci teplotný profil pozdĺž optického vlákna s primárnou ochranou



Obrázok 6.11: Graf zobrazujúci závislosť teploty a sily v čase, vo vzdialenosti 61,1 m.

Tento krát sa časť optického vlákna umiesteného v klieštinách nachádza vo vzdialenosti 61,1 m. Závislosť teploty a sily v čase, v tomto mieste môžeme vidieť na obrázku č. 6.11. Rovnako ako v predchádzajúcom prípade so zvyšujúcou silou spôsobujúcou mechanické napätie nám rástla teplota. Teplota sa začala stúpať pri sile okolo 1N, a každým 1N vzrástla približne o 0,5 °C. Pri tomto type vlákna bol nárast teploty až o 16 °C. Hodnoty všetkých meraní na vlákne s primárnou ochranou ako aj ďalšie príslušné grafy k nim sú súčasťou prílohy.

6.4 Zhodnotenie merania na trhacom stroji FP 10/1

V tomto meraní sme zisťovali teplotnú závislosť na mechanickom napätí, ktoré sme simulovali na trhacom stroji FP 10/1. U použitých vláknoch sme dosiahli rozdielne výsledky. Pri vlákne so sekundárnou ochranou bol nárast teploty minimálny a to o 3 °C, ktorý vzrástol nepatrne po celú dobu merania. Pri vlákne s primárnou ochranou bol nárast teploty až o 16 °C, pričom teplota začala stúpať pri sile okolo 1N a zvyšujúcou sa silou o každý 1N narástla približne o 0,5 °C. Rozdielny nárast teplôt pri dvoch použitých vláknoch môže byť spôsobený tým, že pri vlákne so sekundárnou ochranou sa natiahla najskôr sekundárna ochrana a až potom mechanické napätie pôsobilo priamo na vlákno. Pričom pri vlákne s primárnou ochranou pôsobilo mechanické napätie priamo na vlákno po celú dobu merania. Z meraní je zrejmé, že vplyv mechanického napätia na teplotu v optickom vlákne s primárnou ochranou bol preukázaný. Z dôvodu že vlákno s primárnou ochranou dokazovalo vo výsledkoch väčší nárast teploty pri mechanickom napätí, použili sme ho pri ďalšom meraní. Popis tohto merania je v nasledujúcej kapitole.

6.5 Meranie na skúšobnom lise EU 40.

Meranie na skúšobnom lise EU 40 (obrázok č. 6.5) rovnako ako meranie na trhacom stroji FP 10/1 spočíval v meraní vplyvu mechanického napätia na teplotu. Tento krát bolo optické vlákno umiestené na betónovom trámci s oceľovou výstužou.



Obrázok 6.12: Skúšobný lis EU 40

Ako už bolo uvedené, pre toto meranie sme použili vlákno s primárnou ochranou, pretože v predchádzajúcich meraniach dokazovalo väčší nárast teploty pri vzrastajúcom mechanickom napätí. Na uchytenie optického vlákna na betónový trámec sme použili lepidlo Sikadur -31 CF Rapid, ktoré

sme naniesli deň vopred aby dôkladne vytvrdlo. Spôsob uchytenia optického vlákna na trámec je zobrazený na obrázku č.6.13 kde vidieť, že optické vlákno je upevnené na trámec uhlopriečne, pretože v odbitých rohoch trámca je vedené samotné vlákno, aby sa nepoškodilo o nožičky stojanu lisu EU 40.



Obrázok 6.13: Uchytenie optického vlákna na betónový trámec

Po zatvrdnutí lepidla sme umiestnili betónový trámec na okraj nožičiek stojanu skúšobného lisu EU 40 spôsobom, aby sa optické nepoškodilo (obrázok 6.14). Následne sme optické vlákno pripojili cez predradné vlákno k DTS systému a načítali konfiguračný súbor. Na skúšobnom lise EU 40 sme nastavili posun 2 mm/min a začali sme s meraním. Na betónový trámec lis EU 40 vyvíjal tlak a ten začal postupne praskať. Nezačal sa lámať pretože obsahoval oceľovú výstuž. Prasklina, ktorá sa vytvárala na spodnej strane trámca, kde bolo umiestnené optické vlákno sa začala zväčšovať a tým sa začalo ťahať aj samotné optické vlákno. Prasklina vznikajúca na betónovom trámci je zobrazená na obrázku č. 6.15.



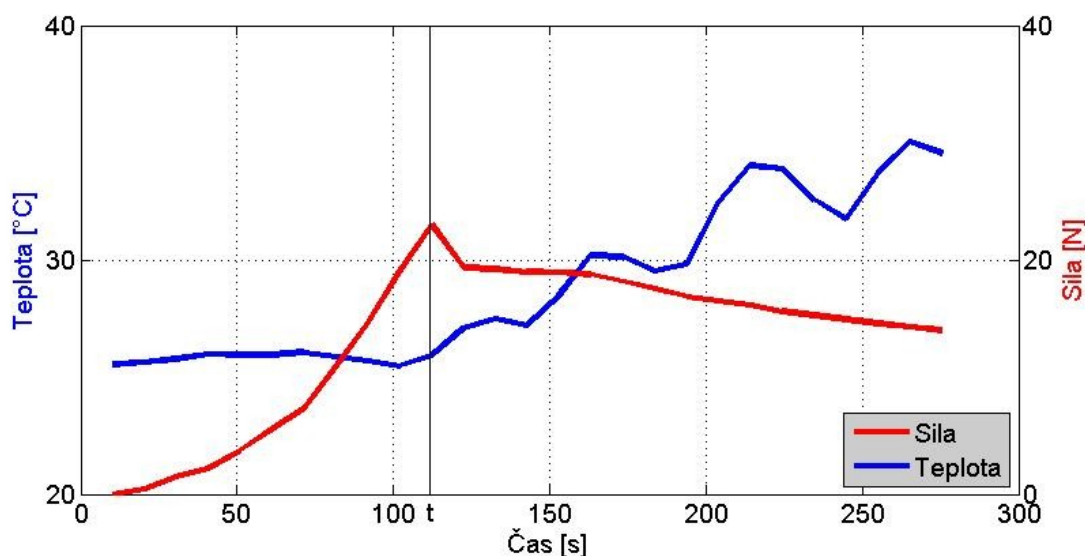
Obrázok 6.14: Umiestenie betónového trámca na skúšobnom lise EU 40



Obrázok 6.15: Prasklina vzniknutá na betónovom trámci

Po pretrhnutí optického vlákna sme oba stroje vypli, uložili namerané dáta a vypracovali príslušný graf, ktorý je znázornený na obrázku č.6.16. Pri meraní bola v miestnosti konštantná teplota 25 °C.

Ako vidieť z grafu, sila ktorá pôsobila na betónový trámec stúpala do času t , kde betónový trámec začal praskať. Hodnota tlaku pri ktorom začal betónový trámec praskať bola 23 N. Prasklina, ktorá vznikla v čase t sa rozširovala, a tým sa zvyšovalo mechanické napätie na optickom vlákne, ktoré bolo v tých miestach upevnené. Sila ktorá pôsobila na betónový trámec začala od času t klesať, pretože betónový trámec držala iba oceľová výstuž. Teplota v optickom vlákne bola do času t konštantná, ale po vytvorení a zväčšovaní praskliny začala postupne stúpať, až kým sa vlákno neroztrhlo. Nárast teploty od vzniku praskliny do roztrhnutia optického vlákna bol 9 °C.



Obrázok 6.16: Vplyv mechanického napätia na teplotu v betónovom trávci

Vypracovaná tabuľka z nameraných hodnôt, z ktorej je zostrojený graf je súčasťou prílohy.

6.6 Zhodnotenie merania na skúšobnom lise EU 40

V tomto meraní sme zisťovali vplyv mechanického napätia na teplotu v optickom vlákne s primárnou ochranou umiestnenom na betónovom trávci s oceľovou výstužou. Z nameraných výsledkov je zrejmé, že s vývinom praskliny a vzrastajúcim mechanickým napätím v optickom vlákne umiestnenom priečne cez prasklinu sa teplota zväčšovala. Teplotný nárast bol o 9°C oproti teplote prostredia. Pretože sila nepôsobila priamo na vlákno, ale na betónový trámec, nemôžeme presne určiť aká sila pôsobila na samotné vlákno. Výsledky, ktoré sme namerali v predchádzajúcom meraní na trhácom stroji FP 10/1 sa ale potvrdili. Takže vplyv mechanického napätia na teplotu bol preukázaný.

7 Záver

Táto práca sa zaoberala využitím optovláknových DTS systémov na monitoring vývinu prasklín mostových konštrukcií. Pretože DTS systémy využívajúce Ramanov rozptyl dokážu snímať iba teplotu pozdĺž optického vlákna, mojou hlavnou úlohou bolo zistiť vplyv mechanického napätia v optickom vlákne na teplotu.

Prvé meranie som uskutočnil na trhacom stroji FP 10/1, ktoré spočívalo v tom, že sa vlákno naťahovalo a tým sa simulovalo mechanické napätie pôsobiace na vlákno. Pri tomto meraní sa testovali dva typy vlákna. Vlákno so sekundárnou ochranou nepreukazoval veľký nárast teploty. Naopak vlákno s primárnou ochranou preukazoval väčší teplotný nárast pri stúpajúcom mechanickom napätí. Takže vplyv mechanického napätia pri tomto type vlákna bol preukázaný.

V druhom meraní som overoval dosiahnuté výsledky vlákna s primárnou ochranou na skúšobnom lise EU 40. Optické vlákno bolo pri tomto meraní pripevnené na betónový trámec s oceľovou výstužou, na ktorom sa pomocou lisu EU 40 vyvíjal tlak, až kým betónový trámec nepraskol. Cez prasklinu ktorá vznikla, viedlo optické vlákno, na ktoré sa s vývinom praskliny zväčšovalo mechanické napätie. Ukázalo sa, že so zväčšujúcim mechanickým napätím sa vo vlákne zvyšovala teplota. Vplyv mechanického napätia na teplotu vo vlákne bol preukázaný a výsledky z predchádzajúceho merania sa potvrdili.

Z dosiahnutých výsledkov tejto práce je zrejmé, že vzrastajúce mechanické napätie v optickom vlákne má vplyv na teplotu. Môžem teda skonštatovať, že DTS systémy by sa istým spôsobom mohli využívať aj ako senzor na monitorovanie vývinu prasklín v mostových konštrukciách.

Použitá literatura

- [1] DADO, Milan, I. TUREK, J. ŠTELINA, L. BITTERER, S. TUREK, E. GROLMUS a P. STIBOR. *Kapitoly z optiky: pre technikov*. Žilina: Žilinská univerzita v Žiline, 1998, 348 s. ISBN 80-7100-390-5.
- [2] DAVID W., Ball. Theory of Raman Spectroscopy. *Spectroscopy* [online]. 2001, roč. 16, č. 11, s. 32-34 [cit. 2013-04-01]. Dostupné z: <http://www.spectroscopyonline.com/spectroscopy/data/articlestandard/spectroscopy/442001/836/article.pdf>
- [3] SINGH, Sunil Pratap, R GANGWAR a N SINGH. NONLINEAR SCATTERING EFFECTS IN OPTICAL FIBERS. *Progress In Electromagnetics Research* [online]. 2007, roč. 74, s. 379-405 [cit. 2013-04-01]. ISSN 1559-8985. DOI: 10.2528/PIER07051102. Dostupné z: <http://www.jpier.org/PIER/pier.php?paper=07051102>
- [4] BOYD, Robert W. *Nonlinear optics*. 3rd ed. Boston: Academic Press, c2008, xix, 613 p. ISBN 9780123694706.
- [5] AGRAWAL, Govind P. *Nonlinear Fiber Optics*. 2 ed. San Diego: Academic Press, 1995, 592 s. ISBN 01-204-5142-5.
- [6] THE UNIVERSITY OF TEXAS AT DALLAS. STIMULATED RAMAN SCATTERING [online]. 2000 [cit. 2013-05-03]. Dostupné z: <http://www.utdallas.edu/~cantrell/ee6328/srs.pdf>
- [7] KOUDELKA, Petr, F HANÁČEK, J LÁTAL a P ŠIŠKA. Úvod do distribuovaných optovláknových systémů založených na Ramanově jevu pro měření teploty. [online]. 2009 [cit. 2013-05-03]. ISSN 1214-9675. Dostupné z: <http://access.feld.cvut.cz/view.php?navezclanku=uvod-do-distribuvanych-optovlaknovych-systemu-zalozenych-na-ramanove-jevu-pro-mereni-teploty&cislocclanku=2010030001>
- [8] WAIT, P.C a T.P NEWSON. Landau Placzek ratio applied to distributed fibre sensing. In: *Optics communications* [online]. Amsterdam: Elsevier, 1 January 1996, s. 141-146 [cit. 2013-03-26]. ISSN 0030-4018. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0030401895005579>
- [9] KOUDELKA, Petr, Andrej LINER, Martin PAPES, Jan LATAL, Vladimír VASINEK, Jan HURTA, Tomas VINKLER a Petr ŠIŠKA. New Sophisticated Analysis Method of Crystallizer Temperature Profile Utilizing Optical Fiber DTS Based on the Stimulated Raman Scattering. *Advances in Electrical and Electronic Engineering* [online]. June 2012, vol. 10, no. 2, s. 106-114 [cit. 2013-04-01]. Dostupné z: <http://advances.ute.sk/index.php/AEEE/article/view/637>
- [10] MOYO, P., J.M.W. BROWNJOHN, R. SURESH a S.C. TJIN. Development of fiber Bragg grating sensors for monitoring civil infrastructure. *Engineering Structures* [online]. 2005, roč. 27, č. 12, s. 1828-1834 [cit. 2013-04-13]. ISSN 01410296. DOI: 10.1016/j.engstruct.2005.04.023. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0141029605002294>

-
- [11] KERSEY, A.D., M.A. DAVIS, H.J. PATRICK, M. LEBLANC, K.P. KOO, C.G. ASKINS, M.A. PUTNAM a E.J. FRIEBELE. Fiber grating sensors. *Journal of Lightwave Technology* [online]. 1997, roč. 15, č. 8, s. 1442-1463 [cit. 2013-04-13]. ISSN 07338724. DOI: 10.1109/50.618377. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=618377>
- [12] SENSORNET LTD. Sentinel DTS User Guide. London.

Zoznam príloh

Příloha.A:	Tabuľka nameraných hodnôt pre meranie vlákna so sekundárnou ochranou.....	xxix
Příloha.B:	Tabuľky nameraných hodnôt pre meranie vlákna s primárnou ochranou	xxxiii
Meranie č.1	xxxiii
Meranie č.2 (Pri tomto meraní bolo pravdepodobne použité poškodené vlákno).....		xxxvi
Meranie č.3	xxxvii
Příloha.C:	Tabuľka nameraných hodnôt z merania na betónovom trámci	xxxix
Příloha.D:	Grafy z meraní vlákna s primárnou ochranou	xl
Meranie č.1	xl
Meranie č.2 (Pri tomto meraní bolo pravdepodobne použité poškodené vlákno).....		xli

Súčasťou BP je CD.

Adresárová štruktúra priloženého CD:

\fotodokumentacia

\vysledky_merani

 \meranie_sekundar

 \meranie_primar

 \meranie_tramec

Príloha.A: Tabuľka nameraných hodnôt pre meranie vlákna so sekundárnou ochranou

Iterácia	Sila [N]	Teplota [°C] vo vzdialenosti				
		67,192 m	68,207 m	69,223 m	70,238 m	71,254 m
1	0,31	20,843	19,921	21,688	23,824	24,822
2	0,73	20,865	20,015	21,516	23,506	24,940
3	1,21	20,991	19,992	21,664	23,913	24,761
4	1,77	20,965	20,066	21,847	23,889	24,911
5	2,04	20,896	19,874	21,691	23,947	24,686
6	2,61	20,771	19,999	21,748	23,945	24,813
7	3,22	20,667	19,693	21,583	23,773	24,612
8	3,92	20,808	19,907	21,700	23,698	24,833
9	4,43	20,987	20,198	21,778	24,001	24,862
10	4,97	20,922	20,139	21,862	24,021	24,999
11	5,53	20,937	20,081	21,923	23,930	24,908
12	6,07	20,687	20,069	21,809	23,837	24,862
13	6,63	20,773	20,055	21,868	23,852	24,919
14	7,16	20,861	20,257	21,747	23,823	24,985
15	7,74	20,808	20,179	21,881	23,828	24,833
16	8,28	20,724	19,968	21,850	23,853	25,008
17	8,85	20,665	20,017	21,877	23,896	24,919
18	9,43	20,790	19,950	21,737	23,721	24,701
19	10	20,945	20,042	21,914	23,834	25,056
20	10,57	20,690	19,833	21,856	23,662	24,973
21	11,12	20,697	19,984	21,803	23,777	25,074
22	11,58	20,819	19,859	22,048	23,840	24,818
23	12,12	20,978	19,930	21,862	23,815	24,804
24	12,64	20,853	19,890	22,055	23,693	24,917
25	13,2	20,803	20,078	21,901	23,914	24,807

Iterácia	Sila [N]	Teplota [°C] vo vzdialenosti [m]				
		67,192 m	68,207 m	69,223 m	70,238 m	71,254 m
26	12,99	20,750	20,144	22,084	23,843	24,626
27	13,64	20,927	20,280	22,091	23,815	24,832
28	14,15	20,928	20,252	22,220	23,946	24,898
29	14,61	20,918	20,139	22,227	23,934	25,048
30	15,15	20,654	20,067	22,155	24,026	24,798
31	15,61	20,635	20,023	22,203	23,901	24,854
32	16,11	20,695	19,865	22,279	23,875	24,809
33	16,65	20,765	19,888	22,245	24,045	25,238
34	17,18	20,733	20,039	22,268	23,977	25,087
35	17,69	20,913	20,055	22,481	24,024	25,088
36	18,18	20,884	20,157	22,303	24,007	25,153
37	18,68	20,914	20,004	22,461	24,327	24,956
38	19,21	20,827	19,975	22,326	23,959	24,977
39	19,72	20,712	19,896	22,557	24,282	25,095
40	20,26	20,774	19,948	22,355	23,983	25,199
41	20,75	20,957	20,060	22,498	24,066	24,983
42	21,27	20,993	19,922	22,409	24,211	25,059
43	21,77	20,845	20,056	22,450	24,188	24,920
44	22,32	20,907	19,886	22,370	24,225	25,227
45	22,8	20,852	20,045	22,523	24,056	25,216
46	23,35	20,837	19,777	22,430	24,232	25,010
47	23,87	20,766	19,893	22,470	24,105	25,101
48	24,38	20,816	19,956	22,676	24,351	25,023
49	24,87	20,719	19,923	22,677	24,150	25,152
50	25,42	20,687	19,926	22,553	24,234	25,263

Iterácia	Sila [N]	Teplota [°C] vo vzdialenosti				
		67,192 m	68,207 m	69,223 m	70,238 m	71,254 m
51	25,96	20,871	19,965	22,639	24,183	25,190
52	26,48	20,904	20,006	22,708	24,212	25,250
53	26,95	20,785	19,868	22,647	24,080	24,979
54	27,47	20,742	19,873	22,628	24,166	25,073
55	27,99	20,754	19,860	22,715	24,089	25,163
56	28,53	20,846	20,040	22,677	24,305	25,259
57	29,07	21,028	20,035	22,733	24,175	25,395
58	29,58	20,744	20,075	22,777	24,275	25,366
59	30,09	20,867	20,562	22,824	24,376	25,498
60	30,64	20,972	20,415	22,717	24,195	25,379
61	31,18	21,046	20,491	22,632	24,178	25,523
62	31,71	21,046	20,597	22,746	24,157	25,503
63	32,16	20,949	20,293	22,635	24,195	25,598
64	32,64	20,808	20,110	22,506	24,103	25,360
65	33,19	20,744	19,898	22,703	24,333	25,117
66	33,77	20,774	19,864	22,633	24,179	25,347
67	34,31	20,618	19,879	22,664	24,190	25,216
68	34,86	20,663	19,707	22,511	24,140	25,193
69	35,37	20,750	19,792	22,697	24,287	25,282
70	35,86	20,834	20,079	22,624	24,151	25,164
71	36,36	20,770	19,882	22,683	24,167	25,171
72	36,88	20,817	19,915	22,691	24,327	25,140
73	37,43	20,684	20,017	22,852	24,131	25,387
74	37,96	20,798	19,832	22,718	24,329	25,118
75	38,49	20,722	20,032	22,722	23,965	25,385

Iterácia	Sila [N]	Teplota [°C] vo vzdialenosti [m]				
		67,192 m	68,207 m	69,223 m	70,238 m	71,254 m
76	39,02	20,827	19,997	22,902	24,289	24,962
77	39,53	20,799	19,908	22,797	24,159	25,069
78	40,02	20,721	20,009	22,711	24,182	25,300
79	40,54	20,622	19,844	22,888	24,098	24,956
80	40,72	20,679	19,969	22,963	24,124	25,300
81	40,09	20,788	19,925	22,744	24,043	25,449
82	40,57	20,786	19,911	22,989	24,008	25,318
83	41,01	20,676	19,901	23,038	24,264	25,108
84	41,03	20,897	20,161	22,991	24,341	25,531
85	40,99	20,660	20,020	22,913	24,301	25,233
86	41,2	20,873	19,921	22,958	24,329	25,226
87	41,39	20,735	20,007	23,212	24,606	25,575
88	41,53	20,877	20,131	22,969	24,473	25,400
89	41,63	20,789	19,885	23,024	24,356	25,243
90	41,75	20,655	20,025	23,295	24,364	25,210
91	41,95	21,055	20,708	23,338	24,448	25,133
92	42,15	21,100	20,987	23,595	24,281	25,268
93	42,38	21,099	20,817	23,523	24,518	25,536
94	42,63	21,118	20,946	23,571	24,543	25,176
95	42,86	21,089	20,840	23,685	24,460	25,054
96	43,12	21,053	20,814	23,612	24,470	25,576
97	43,37	21,128	20,889	23,734	24,602	25,737
98	43,61	21,127	20,819	23,689	24,540	25,504
99	43,82	21,086	20,933	23,718	24,531	25,575
100	44	21,123	20,824	23,780	24,635	25,521

Iterácia	Sila [N]	Teplota [°C] vo vzdialenosti				
		67,192 m	68,207 m	69,223 m	70,238 m	71,254 m
101	44,23	21,146	20,981	24,040	24,496	25,631
102	44,38	21,104	20,780	24,074	24,689	25,559
103	44,45	21,060	20,898	24,275	24,731	25,720
104	44,56	21,041	20,750	23,871	24,798	25,537
105	44,67	21,152	20,975	24,173	24,688	25,513
106	44,83	20,986	20,798	24,114	24,762	25,916
107	45,01	20,983	20,733	23,988	24,580	25,582
108	45,19	21,073	20,791	23,806	24,667	25,740
109	45,39	21,072	20,793	23,802	24,730	25,672
110	45,62	21,013	20,722	23,629	24,696	25,760
111	45,85	20,896	20,707	23,670	24,626	25,774
112	46,13	21,027	20,697	23,576	24,460	25,885
113	46,38	20,967	20,737	23,824	24,651	25,976
114	46,64	21,162	21,076	24,015	24,766	25,844
115	46,88	21,286	21,048	23,623	24,599	26,041
116	47,1	21,173	21,047	23,862	24,579	25,926
117	47,34	21,137	20,900	23,903	24,554	25,946
118	47,56	20,963	20,913	23,658	24,669	25,946
119	47,82	21,123	20,875	23,928	24,744	25,812
120	48,05	21,018	21,018	23,941	24,660	25,871
121	48,33	21,166	21,099	24,168	24,834	25,999
122	48,57	21,214	21,161	24,123	24,757	26,228
123	48,82	21,403	21,151	24,153	24,841	26,121
124	49,1	21,006	20,911	24,136	24,760	25,893
125	49,39	21,072	20,745	24,015	24,816	26,019

Iterácia	Sila [N]	Teplota [°C] vo vzdialenosti [m]				
		67,192 m	68,207 m	69,223 m	70,238 m	71,254 m
126	49,58	21,113	20,835	23,983	24,967	26,173
127	49,9	20,966	20,751	24,082	24,991	25,820
128	50,23	20,923	20,888	23,979	24,923	25,852
129	50,45	21,093	20,767	23,937	24,870	25,967
130	50,75	20,937	20,903	24,069	24,767	26,006
131	51,04	20,995	20,875	23,956	24,927	25,808
132	51,35	21,051	20,757	23,894	24,886	25,750
133	51,64	20,965	20,726	24,088	24,791	25,978
134	51,95	20,898	20,803	23,902	24,903	25,877
135	52,23	20,938	20,842	24,182	24,774	26,055
136	52,56	21,050	20,855	23,869	24,756	26,157
137	52,83	20,941	20,808	24,098	24,786	26,117
138	53,11	21,055	20,959	24,150	24,756	26,463
139	53,42	21,082	20,945	24,195	24,928	26,097
140	53,69	21,088	21,088	23,972	24,678	26,449
141	53,97	21,151	21,041	24,127	24,657	26,136
142	54,25	20,998	20,836	23,768	24,778	26,183
143	54,49	21,000	20,913	24,033	24,618	25,688
144	54,73	20,742	20,856	23,897	24,759	26,138
145	54,94	21,037	20,861	23,941	24,783	26,051
146	55,18	20,986	20,969	24,066	24,748	26,119
147	55,41	21,024	20,678	24,151	24,767	26,123
148	55,64	20,757	20,787	24,198	24,694	26,158
149	55,87	20,780	20,862	24,184	24,959	26,267
150	56,15	20,836	20,775	24,285	25,084	26,083

Iterácia	Sila [N]	Teplota [°C] vo vzdialenosti				
		67,192 m	68,207 m	69,223 m	70,238 m	71,254 m
151	56,35	20,947	20,879	24,124	25,024	26,051
152	56,45	20,814	20,787	24,044	25,063	26,117
153	56,61	21,062	20,765	24,101	24,989	26,232
154	56,81	21,017	21,192	24,392	24,964	26,005
155	56,99	20,837	21,070	24,481	24,985	26,120
156	57,05	21,038	21,025	24,297	24,910	26,312
157	57,23	21,016	20,970	24,356	25,043	26,399
158	57,44	20,892	20,939	24,269	24,887	26,320
159	57,62	21,099	20,835	24,276	25,043	26,255
160	57,86	20,900	20,812	24,272	24,976	26,168
161	58,07	21,073	20,891	24,111	24,899	26,084
162	58,28	20,854	20,750	24,277	25,033	26,293
163	58,5	20,855	20,620	24,312	25,190	26,180
164	58,67	20,998	20,900	24,283	24,951	26,151
165	58,88	20,937	20,904	24,533	25,026	26,187
166	59,09	20,893	20,787	24,352	25,011	26,305
167	59,35	20,991	20,838	24,426	25,100	26,086
168	59,46	21,081	21,055	24,292	24,875	26,262
169	59,67	20,960	21,026	24,605	24,987	26,401
170	59,8	20,965	21,093	24,611	25,290	26,309
171	57,52	21,003	20,984	24,550	25,296	26,193
172	57,47	21,075	21,102	24,624	24,981	26,178
173	57,62	21,054	21,009	24,583	25,082	26,210
174	57,73	21,002	21,177	24,503	24,830	26,178
175	40,65	20,973	21,096	24,737	25,119	26,348

Príloha.B: Tabuľky nameraných hodnôt pre meranie vlákna s primárnou ochranou

Meranie č.1

Iterácia	Sila [N]	Teplota [°C] vo vzdialenosti				
		63,13 m	64,146 m	65,161 m	66,177 m	67,192 m
1	1,76	22,403	21,475	22,417	25,088	22,016
2	2,18	22,438	21,481	22,478	25,293	21,914
3	2,59	22,452	21,583	22,694	25,442	21,947
4	3,03	22,581	21,544	22,775	25,621	21,911
5	3,47	22,538	21,577	22,857	25,751	22,125
6	3,88	22,580	21,370	22,920	26,079	21,897
7	4,33	22,361	21,523	22,931	26,230	22,077
8	4,77	22,432	21,498	23,147	26,150	22,311
9	5,21	22,474	21,615	23,278	26,503	22,101
10	5,68	22,427	21,529	23,307	26,489	22,013
11	6,11	22,551	21,738	23,495	26,785	22,244
12	6,53	22,615	21,504	23,525	26,753	22,407
13	7,01	22,417	21,648	23,269	26,847	22,381
14	7,5	22,684	21,724	23,689	26,632	22,445
15	7,96	22,661	21,852	23,649	26,695	22,511
16	8,39	22,685	21,484	23,657	26,878	22,288
17	8,85	22,509	21,695	23,708	26,879	22,280
18	9,28	22,529	21,654	23,669	26,720	22,502
19	9,79	22,372	21,642	23,645	26,885	22,745
20	10,29	22,450	21,668	23,736	27,103	22,517
21	10,71	22,449	21,563	23,770	27,343	22,266
22	11,24	22,316	21,507	23,693	27,166	22,660
23	11,67	22,514	21,649	23,861	27,012	22,632

Iterácia	Sila [N]	Teplota [°C] vo vzdialenosti				
		63,13 m	64,146 m	65,161 m	66,177 m	67,192 m
24	12,09	22,430	21,659	24,022	27,386	22,689
25	12,65	22,409	21,734	23,935	27,133	22,760
26	13,15	22,476	21,654	23,908	27,606	22,749
27	13,67	22,513	21,671	24,119	27,638	22,727
28	14,09	22,508	21,672	24,126	27,411	22,568
29	14,6	22,790	21,948	24,401	27,508	22,777
30	15,09	22,796	21,693	24,331	27,882	22,757
31	15,62	22,599	21,899	24,352	28,092	23,293
32	16,02	22,604	21,669	24,366	28,039	23,125
33	16,53	22,495	21,749	24,710	28,277	22,943
34	17,08	22,725	21,705	24,618	28,253	23,147
35	17,5	22,560	21,772	24,570	28,277	23,311
36	18,01	22,601	21,832	24,692	28,272	23,267
37	18,54	22,446	21,571	24,807	28,302	23,403
38	19,09	22,687	21,827	24,963	28,319	23,391
39	19,51	22,735	21,884	24,979	28,824	23,642
40	20,04	22,481	21,707	25,146	29,056	23,752
41	20,29	22,460	21,608	25,125	28,733	23,696
42	20,64	22,546	21,756	25,110	28,964	23,457
43	18,67	22,477	21,783	25,067	28,790	23,674
44	19,19	22,475	21,852	25,026	29,137	24,057
45	19,6	22,769	21,782	25,487	29,788	24,161
46	20,18	22,523	21,624	25,420	29,346	23,769

Iterácia	Sila [N]	Teplota [°C] vo vzdialenosti				
		63,13 m	64,146 m	65,161 m	66,177 m	67,192 m
47	20,6	22,532	21,839	25,441	29,353	23,931
48	21,15	22,660	21,724	25,518	32,548	25,973
49	21,52	22,575	21,815	25,644	32,482	26,463
50	22,08	22,600	21,817	25,464	32,391	26,656
51	22,34	22,620	21,788	25,554	32,031	26,143
52	22,8	22,531	21,659	25,502	32,173	25,628
53	23,26	22,510	21,763	25,477	32,451	26,655
54	23,72	22,703	21,831	25,715	32,353	26,036
55	24,2	22,702	21,828	25,432	32,161	26,210
56	24,65	22,682	21,865	25,841	32,970	26,397
57	24,94	22,631	21,767	26,010	33,684	27,539
58	25,5	22,758	21,813	26,012	34,326	27,448
59	25,96	22,811	21,935	26,022	33,954	27,498
60	26,39	22,649	22,013	26,030	33,436	27,558
61	26,73	22,816	21,887	25,918	33,739	27,545
62	27,22	22,649	21,926	26,224	34,382	27,715
63	27,54	22,730	21,870	26,591	34,923	27,758
64	28	22,546	21,842	26,462	34,795	27,927
65	28,47	22,737	21,959	26,613	35,101	28,203
66	28,85	22,651	21,880	26,537	35,421	28,920
67	29,34	22,584	21,955	26,225	35,450	28,657
68	29,84	22,698	21,955	26,717	36,255	29,457
69	30,3	22,805	21,890	26,716	36,343	29,978

Iterácia	Sila [N]	Teplota [°C] vo vzdialenosti				
		63,13 m	64,146 m	65,161 m	66,177 m	67,192 m
70	30,75	22,675	21,954	27,039	36,241	29,472
51	22,34	22,620	21,788	25,554	32,031	26,143
52	22,8	22,531	21,659	25,502	32,173	25,628
53	23,26	22,510	21,763	25,477	32,451	26,655
54	23,72	22,703	21,831	25,715	32,353	26,036
55	24,2	22,702	21,828	25,432	32,161	26,210
56	24,65	22,682	21,865	25,841	32,970	26,397
57	24,94	22,631	21,767	26,010	33,684	27,539
58	25,5	22,758	21,813	26,012	34,326	27,448
59	25,96	22,811	21,935	26,022	33,954	27,498
60	26,39	22,649	22,013	26,030	33,436	27,558
61	26,73	22,816	21,887	25,918	33,739	27,545
62	27,22	22,649	21,926	26,224	34,382	27,715
63	27,54	22,730	21,870	26,591	34,923	27,758
64	28	22,546	21,842	26,462	34,795	27,927
65	28,47	22,737	21,959	26,613	35,101	28,203
66	28,85	22,651	21,880	26,537	35,421	28,920
67	29,34	22,584	21,955	26,225	35,450	28,657
68	29,84	22,698	21,955	26,717	36,255	29,457
69	30,3	22,805	21,890	26,716	36,343	29,978
70	30,75	22,675	21,954	27,039	36,241	29,472
71	31,24	22,603	21,928	26,895	36,700	29,880
72	31,45	22,699	21,880	26,797	36,692	31,140

Iterácia	Sila [N]	Teplota [°C] vo vzdialenosti				
		63,13 m	64,146 m	65,161 m	66,177 m	67,192 m
73	32,02	22,625	21,702	26,774	36,592	30,617
74	32,49	22,808	21,955	26,903	36,425	30,376
75	32,98	22,653	21,734	26,850	37,045	31,192
76	33,46	22,551	22,006	26,941	36,952	31,628
77	33,56	22,743	21,959	27,203	37,812	32,081
78	34,06	22,734	21,954	27,578	37,595	31,869
79	34,55	22,765	22,079	27,624	37,670	32,662
80	35,05	22,762	22,052	27,646	37,617	31,679
81	35,29	22,914	21,916	27,665	38,270	32,249
82	35,65	22,565	21,687	27,551	38,702	33,447
83	36,14	22,672	21,840	28,017	39,287	33,670
84	36,24	22,736	21,997	27,974	38,123	33,362
85	35,85	22,699	21,958	27,987	38,550	32,540
86	35,99	22,683	21,897	28,381	39,754	34,034
87	36,5	22,484	21,780	28,341	39,143	35,146
88	36,64	22,500	21,875	28,719	39,047	34,266
89	37,14	22,590	21,882	29,296	39,936	34,761
90	37,65	22,708	21,986	29,296	39,237	34,412
91	38,08	22,521	21,838	28,926	39,006	35,255
92	38,11	22,809	22,064	28,843	39,346	34,582
93	38,55	22,644	21,813	29,163	40,033	34,576

Iterácia	Sila [N]	Teplota [°C] vo vzdialenosti				
		63,13 m	64,146 m	65,161 m	66,177 m	67,192 m
94	38,97	22,685	21,839	29,258	40,249	36,289
95	39,35	22,569	21,811	29,070	39,378	35,549
96	39,55	22,704	22,036	29,119	40,115	35,526
97	39,78	22,494	22,016	29,729	41,190	38,072
98	40,02	22,582	21,921	29,642	40,863	36,837
99	40,24	22,464	21,835	29,624	41,133	36,899
100	40,37	22,605	21,967	29,552	40,586	37,894
101	40,47	22,627	21,980	30,074	42,101	38,984
102	40,51	22,550	21,970	30,362	41,667	39,163
103	40,62	22,475	21,898	30,723	41,889	38,723
104	40,59	22,583	21,886	30,991	42,442	39,534
105	40,5	22,566	21,888	31,165	42,120	40,436
106	40,51	22,669	21,873	31,983	42,800	42,914
107	40,43	22,899	22,143	32,671	43,713	43,717
108	40,31	22,599	21,936	33,284	43,697	44,997
109	40,17	22,630	21,936	33,697	43,336	46,659
110	40,27	22,638	22,196	34,359	42,346	47,613
111	40,45	22,523	22,467	34,938	41,914	48,687
112	40,66	22,711	22,578	35,252	42,021	47,798
113	40,91	22,710	22,574	35,204	41,794	51,163
114	41,1	22,662	22,657	35,048	41,857	49,281

Meranie č.2 (Pri tomto meraní bolo pravdepodobne použité poškodené vlákno)

Iterácia	Sila [N]	Teplota [°C] vo vzdialenosti				
		59,069 m	60,084 m	61,1 m	62,115 m	63,13 m
1	0,21	24,385	24,955	26,220	26,452	25,012
2	0,59	24,485	25,040	26,248	26,518	25,185
3	0,99	24,879	25,617	26,347	26,464	25,398
4	1,4	24,627	25,261	26,342	26,674	25,375
5	1,79	24,638	25,323	26,539	26,788	25,452
6	2,24	24,462	25,116	26,464	26,962	25,299
7	2,68	24,471	24,927	26,347	26,765	25,211
8	3,13	24,457	24,990	26,498	26,725	25,446
9	3,58	24,757	25,214	26,532	27,122	25,734
10	4	24,536	24,995	26,654	27,079	25,293
11	4,44	24,475	25,030	26,743	27,452	25,551
12	4,89	24,647	25,229	26,594	27,393	25,531
13	5,31	24,685	25,197	26,823	27,514	25,976
14	5,76	24,680	25,280	26,703	27,420	25,766
15	6,16	24,711	25,613	26,863	27,469	25,825
16	6,65	24,717	25,410	26,900	27,534	25,682
17	7,05	24,588	25,340	27,021	27,759	25,793
18	7,53	24,658	25,375	27,048	27,808	25,949
19	7,96	24,628	25,168	27,049	27,752	25,785
20	8,42	24,479	24,980	27,014	27,928	25,812
21	8,91	24,470	25,160	27,062	27,788	25,738
22	9,37	24,576	25,097	27,023	28,207	25,903

Iterácia	Sila [N]	Teplota [°C] vo vzdialenosti [m]				
		59,069 m	60,084 m	61,1 m	62,115 m	63,13 m
23	9,82	24,709	25,330	27,378	28,419	25,814
24	10,28	24,395	24,884	27,070	28,382	25,654
25	10,77	24,803	25,413	27,418	28,426	26,038
26	11,22	24,961	25,766	27,561	28,797	25,953
27	11,65	24,753	25,468	27,548	28,739	26,222
28	12,14	24,693	25,219	27,781	29,073	26,353
29	12,65	24,752	25,318	27,685	29,144	26,411
30	13,12	24,765	25,230	27,819	29,660	26,458
31	13,55	24,609	25,090	27,648	29,551	26,474
32	14,09	24,648	25,147	27,754	29,197	26,536
33	14,58	24,709	25,133	27,848	29,270	26,754
34	15,07	24,472	25,094	27,765	29,262	26,701
35	15,55	24,613	24,937	27,837	29,515	26,966
36	16,02	24,555	25,053	27,760	29,347	26,916
37	16,55	24,682	25,273	27,797	29,447	27,108
38	17,08	24,698	25,320	27,621	29,533	26,998
39	17,53	24,615	25,343	28,113	29,828	27,196
40	18	24,710	25,107	27,948	29,889	27,402
41	18,55	24,781	25,197	28,030	30,013	27,466
42	19,05	24,546	25,263	28,075	30,011	27,185
43	19,54	24,741	25,189	27,790	33,776	26,334

Meranie č.3

Iterácia	Sila [N]	Teplota [°C] vo vzdialenosti				
		58,053 m	59,069 m	60,084 m	61,1 m	62,115 m
1	0,28	23,688	24,127	24,548	24,474	24,394
2	0,59	23,458	24,075	24,48	24,369	24,47
3	0,92	23,459	24,25	24,563	24,777	24,457
4	1,27	23,494	24,285	24,588	24,799	24,621
5	1,63	23,533	24,354	24,725	24,99	24,765
6	2	23,514	24,341	24,675	25,312	24,784
7	2,37	23,469	24,094	24,78	25,504	24,713
8	2,74	23,504	24,06	24,807	25,722	24,827
9	3,12	23,554	24,186	25,099	25,845	25,011
10	3,49	23,462	24,166	25,027	26,122	24,923
11	3,86	23,506	24,179	25,081	26,201	25,202
12	4,23	23,374	24,118	25,079	26,485	25,147
13	4,6	23,455	24,06	25,173	26,874	25,187
14	4,99	23,58	24,126	25,32	27,014	25,155
15	5,36	23,487	24,239	25,402	27,043	25,239
16	5,75	23,61	24,064	25,201	26,985	25,294
17	6,12	23,523	24,163	25,393	26,976	25,164
18	6,54	23,602	24,087	25,526	27,224	25,121
19	6,96	23,612	24,224	25,54	27,459	25,459
20	7,37	23,678	24,316	25,656	27,509	25,535
21	7,81	23,714	24,252	25,52	27,868	25,712
22	8,11	23,921	24,305	25,532	27,93	25,382
23	8,58	23,919	24,395	25,899	28,707	25,979

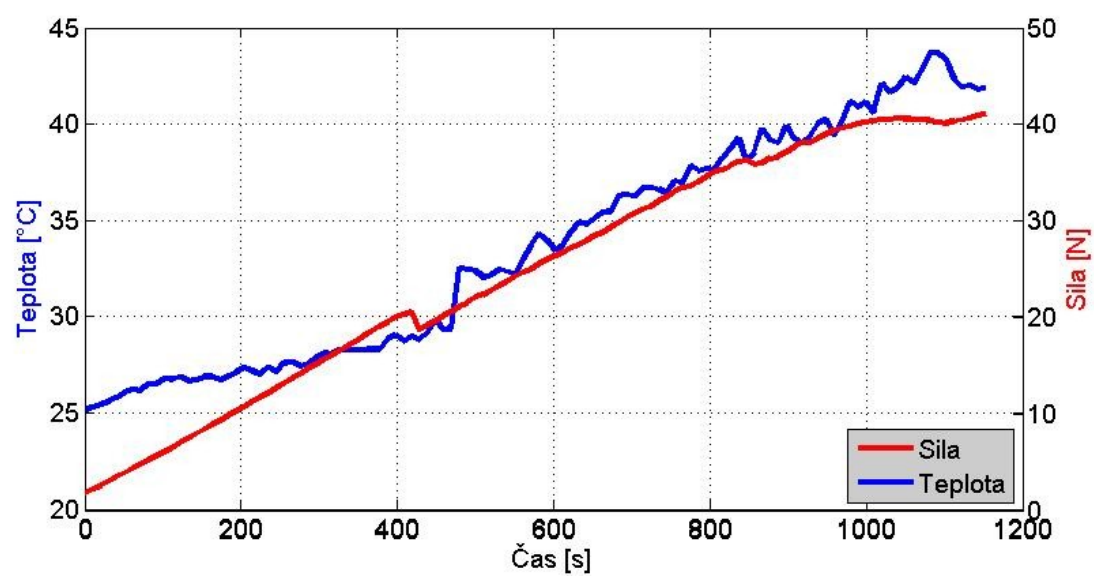
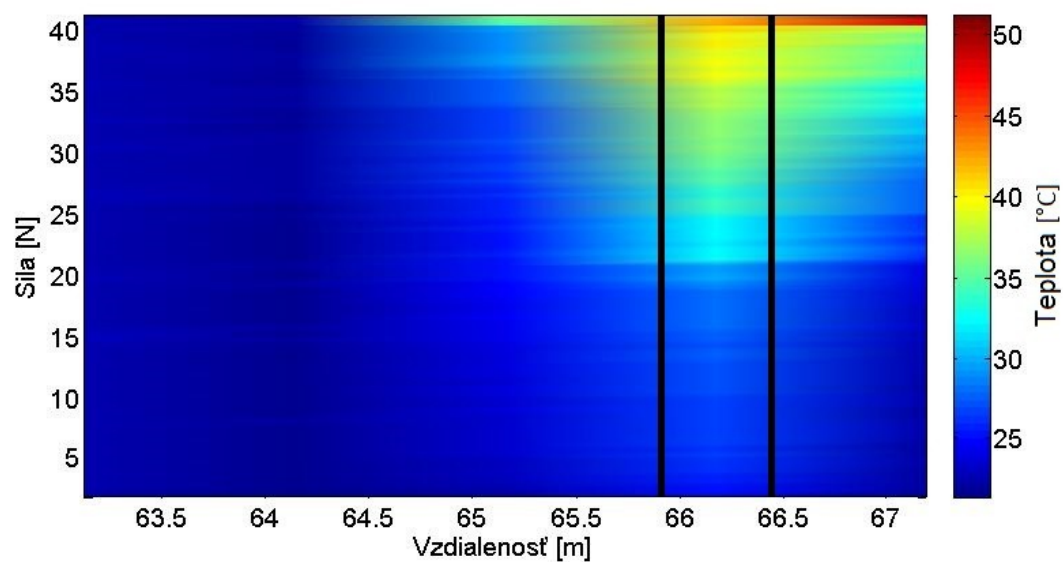
Iterácia	Sila [N]	Teplota [°C] vo vzdialenosti [m]				
		58,053 m	59,069 m	60,084 m	61,1 m	62,115 m
24	8,95	23,864	24,307	25,921	29,102	26,301
25	9,4	23,92	24,329	25,958	29,389	26,22
26	9,8	23,963	24,343	26,089	29,767	26,423
27	10,15	23,847	24,378	26,101	29,764	26,163
28	10,56	23,861	24,388	26,103	30,128	26,246
29	11,03	23,878	24,133	26,245	30,233	26,47
30	11,42	23,903	24,31	26,337	30,247	26,373
31	11,86	23,949	24,368	26,465	30,427	26,366
32	12,29	24,018	24,448	26,431	30,286	26,429
33	12,61	23,969	24,255	26,528	30,827	26,388
34	12,99	23,977	24,419	26,467	30,999	26,366
35	13,45	23,806	24,36	26,524	30,9	26,174
36	13,9	23,815	24,094	26,375	30,737	26,123
37	14,29	23,836	24,219	26,447	30,903	26,411
38	14,75	24,051	24,532	26,462	31,263	26,526
39	15,18	23,745	24,356	26,43	31,3	26,295
40	15,46	23,918	24,402	26,501	31,557	26,252
41	15,67	23,94	24,572	26,51	32,31	26,354
42	16,19	24,001	24,608	26,953	32,865	26,72
43	16,68	23,788	24,475	26,961	32,629	26,709
44	17,14	23,777	24,419	26,737	32,637	26,399
45	17,6	23,614	24,252	26,817	32,757	26,297
46	18,07	23,748	24,359	26,932	33,183	26,305

Iterácia	Sila [N]	Teplota [°C] vo vzdialenosti				
		58,053 m	59,069 m	60,084 m	61,1 m	62,115 m
47	18,31	23,791	24,275	26,961	33,373	27,005
48	18,81	23,554	24,068	26,96	33,741	26,885
49	19,17	23,702	24,154	27,185	34,527	26,113
50	19,68	23,801	24,446	27,417	35,035	26,482
51	20,14	23,749	24,404	27,567	34,92	26,814
52	20,6	24,054	24,626	27,592	35,106	26,711
53	21,09	23,936	24,659	27,446	35,413	26,853
54	21,24	23,837	24,639	27,746	35,937	26,51
55	21,77	23,887	24,62	27,96	35,992	26,782
56	21,79	23,807	24,693	27,846	36,119	27,36
57	22,29	23,729	24,642	27,531	35,589	27,161
58	22,81	23,7	24,469	27,616	35,792	27,03
59	23,32	23,636	24,43	27,263	35,159	26,909
60	23,77	23,63	24,508	27,421	35,767	27,291
61	24,24	23,396	24,316	27,397	35,593	27,566
62	24,65	23,854	24,697	27,55	35,995	26,915
63	25,14	23,636	24,618	27,588	35,86	27,282
64	25,32	23,467	24,325	27,453	35,849	27,753
65	25,85	23,463	24,304	27,327	35,352	27,919
66	26,26	23,713	24,474	27,436	35,355	27,442

Iterácia	Sila [N]	Teplota [°C] vo vzdialenosti [m]				
		58,053 m	59,069 m	60,084 m	61,1 m	62,115 m
67	26,7	23,791	24,606	27,253	35,01	26,592
68	27,18	23,627	24,556	27,522	35,483	26,462
69	27,67	23,607	24,614	27,412	35,388	26,559
70	28,1	23,545	24,597	27,676	35,606	26,765
71	28,48	23,581	24,62	27,509	35,822	26,171
72	29,01	23,662	24,447	27,613	36,424	25,623
73	29,45	23,479	24,454	27,631	36,765	25,49
74	29,26	23,434	24,161	27,958	37,268	26,643
75	29,76	23,454	24,361	27,834	38,683	27,123
76	30,26	23,555	24,371	28,064	38,535	25,976
77	30,72	23,528	24,465	28,163	38,921	26,379
78	31,21	23,745	24,644	28,359	39,977	26,486
79	31,7	23,398	24,241	28,107	39,23	27,114
80	32,12	23,566	24,304	28,132	39,157	26,521
81	32,55	23,956	24,51	28,214	39,698	26,611
82	33,04	23,638	24,495	28,214	38,987	26,872
83	33,46	23,47	24,622	28,35	39,507	27,048
84	33,95	23,716	24,801	28,259	39,989	26,764
85	34,16	23,823	24,548	28,506	40,634	26,921

Příloha.C: Tabuľka nameraných hodnôt z merania na betónovom trámci

Iterácia	Sila [N]	Teplota [°C]
1	0,02	25,53
2	0,41	25,634
3	1,50	25,769
4	2,15	25,96
5	3,72	25,943
6	5,56	25,939
7	7,30	26,049
8	10,84	25,854
9	14,57	25,688
10	19,02	25,469
11	23,00	25,915
12	19,36	27,093
13	19,24	27,493
14	18,95	27,199
15	18,94	28,479
16	18,77	30,193
17	18,20	30,14
18	17,52	29,506
19	16,89	29,806
20	16,49	32,486
21	16,15	34,016
22	15,61	33,887
23	15,27	32,559
24	14,89	31,737
25	14,55	33,708
26	14,30	35,064
27	14,01	34,543



Meranie č.2 (Pri tomto meraní bolo pravdepodobne použité poškodené vlákno)

